
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3901T025 – Přírodovědné inženýrství

**Monitorování zrcadel v detektoru Čerenkovova
záření**

**Online monitoring mirrors in detector of
Cherenkov's radiation**

Diplomová práce

Autor:	Marek Švec
Vedoucí práce:	Doc. RNDr. Miroslav Šulc Ph.D (TUL)
Konzultant:	Dr. Fulvio Tassarotto (INFN Trieste)

V Liberci 22. 09. 2007

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 22. 09. 2007

Podpis

Poděkování

Hlavní poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce Miroslavu Šulcovi za jeho příkladné vedení a pomoc při tvorbě této diplomové práce.

Dále zde děkuji Miroslavu Fingerovi z Karlovy univerzity v Praze za umožnění a financování cest do CERN.

Zvláštní poděkování patří mému konzultantovi Fulvio Tassarotto a Silvii dala Tore z INFN v Terstu, kteří mi umožnili pracovat delší dobu v jejich týmu v CERN na detektoru RICH-1 a byli mě k dispozici vždy radou i skutkem.

Na závěr bych chtěl poděkovat mým rodičům za jejich podporu a financování studií a také přítelkyni Marušce za dodávání síly i ve dnech kdy já ji ztrácel.

Abstrakt

Monitorování zrcadel v detektoru Čerenkovova záření

Detektor RICH-1 experimentu COMPASS v CERN na urychlovači SPS je velice složitý detektor Čerenkovova záření, užívající plyn C_4F_{10} jako aktivní médium, které vytváří Čerenkovův efekt. RICH-1 obsahuje dva odrazné sférické povrchy s celkovou plochou $21m^2$, umístěnou uvnitř detektoru současně s plynem C_4F_{10} . Sférické povrchy se skládají ze 68 šestiúhelníkových a 48 pětiúhelníkových zrcadel, kde každé zrcadlo má možnost samostatného nastavení náklonu. Před počátkem měření v RICH-1 by mělo být každé zrcadlo přesně nastaveno do požadovaných poloh, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření. S ohledem na vnější vlivy – vibrace, změny teplot, změny hydrostatického tlaku, dochází k narušení přesného nastavení zrcadel. Tyto výchylky zrcadel bylo nemožné monitorovat a kontrolovat během získávání dat při chodu experimentu v rozmezí 6 - 8 měsíců v roce.

S ohledem na tyto příčiny vychýlení zrcadel byla užita a navrhnutá metoda stálého monitorování zrcadel. V ohniskových vzdálenostech zrcadel uvnitř detektoru byla umístěna čtvercová síť, vyrobená z reflexních proužků, které jsou osvětleny vysoce svítivými LED diodami. Obrázek této sítě se odráží ve sférických zrcadlech a je snímán čtyřmi fotoaparáty s velmi vysokým rozlišením. Každé minimální vychýlení zrcadel od jejich nastavené polohy, vytvoří nespojitost čar v obrazu snímáným fotoaparáty a tím přímo odhalí jednotlivá, nesprávně nastavená zrcadla. Měření může poskytovat informaci o absolutní odchylce zrcadla s přesností na 0,1 mrad pomocí analýzy obrazu v subpixelovém rozlišení.

Byla provedena nezávislá kontrola a kalibrace této měřicí metody ve fyzikální laboratoři. Kontrola se skládala z testování fotoaparátu s objektivem, reflexní sítě a osvětlení reflexní sítě. Kalibrace této metody ve fyzikální laboratoři byla provedena pro první kvadrant v detektoru RICH-1 tj. 30 poloh zrcadla vůči prvnímu fotoaparátu, s použitím laserového interferometru. Ostatní polohy zrcadel vůči zbylým fotoaparátům jsou stejné, pouze jen zrcadlově obráceny.

Abstract

Online monitoring mirrors in detector of Cherenkov's radiation

The detector RICH-1 of the COMPASS experiment at CERN SPS is a large size gaseous Cherenkov detector using C_4F_{10} as radiator gas, with 2 reflecting spherical surfaces, covering a total area of about 21 m^2 hosted in the radiator vessel. The segmented surfaces are formed by 68 hexagonal and 48 pentagonal mirrors, with individual degrees of freedom for angular adjustment. They had been carefully adjusted before the start of the experiment data taking, but the influence of external vibrations, temperature fluctuation and hydrostatic pressure due to the radiator gas cause the misalignments of some mirrors. There was no possibility to check and monitor this effect during the data taking period of typically 6-8 months.

An original method was applied for on-line mirror alignment monitoring. The rectangular grid, placed near the focal plane of mirror wall inside the detector vessel, is made of reflecting strips. It is illuminated by high luminosity LEDs. The images of this grid, reflected by the spherical mirrors, are collected by four high resolution cameras. Small tilts of a mirror create discontinuities of grid line images, reflected by adjacent mirrors. This observed shift of line images provides the direction and amount of the mirror tilt. The measurement can give information about the absolute tilt with an accuracy of 0.1 mrad via image analysis with sub-pixel resolution. An independent check and calibration of this method was performed in laboratory for all the 30 possible relative mirror-camera positions of a RICH-1 quadrant, using, as reference, a laser interferometer.

Obsah

1	Úvod	7
2	COMPASS – experiment v CERN	8
3	RICH-1	10
3.1	Princip činnosti RICH-1	10
3.2	Popis jednotlivých částí detektoru RICH-1	13
4	Systém pro sledování zrcadel	13
4.1	Technické parametry zrcadel a jejich uchycení	14
5	Výběr monitorovacího zařízení	17
5.1	Výběr fotoaparátu	17
5.1.1	Parametry fotoaparátu CANON EOS 5D	17
5.1.2	Kvalita snímku	19
5.1.3	Výhody a nevýhody CANON EOS 5D	19
5.2	Výběr objektivu	20
5.2.1	Vlastnosti potřebné pro výběr objektivu	20
5.2.2	Difrakční limita a hloubka ostrosti zobrazení	25
5.2.3	Objektiv CANON EF 24 mm, f/2,8	28
5.2.4	Testování objektivu	29
6	Vytvoření laboratorních podmínek	30
6.1	Souřadnice fotoaparátu a sítě	30
6.2	Simulace v programu ZEMAX	31
6.3	Posuvná soustava pro modelování poloh zrcadel	32
6.3.1	Konstrukce pro posun fotoaparátu	32
6.3.2	Stojan pro naklápění zrcadla	33
7	Testování jednotlivých částí systému	34
7.1	Pravoúhlá síť	34
7.1.1	Materiál sítě	34
7.1.2	Princip odrazu reflexních pásků	35
7.2	Testování osvětlení sítě	36
7.2.1	Výběr světelného zdroje	36
7.2.2	Hledání nejlepší expoziční doby	41
7.2.3	Velikost kuželu světla	45
7.3	Určení šířky pásku a vzdálenosti mezi nimi	46
8	Měřítka vychýlení zrcadel	47
8.1	Určení přesného vychýlení zrcadla	48
8.2	Testování měřicí metody	50
8.2.1	Testování s kruhovým zrcadlem	50
8.2.2	Testování se zrcadlem z RICH-1	51
8.2.3	Počet pixelů na mm	54
9	Závěrečné měření všech jednotlivých zrcadel	55
9.1	Získání souřadnic zrcadel	55
9.1.1	Příklady přepočtů pro nastavování souřadnic monitorovací soustavy	58
9.2	Přesné určování vzdálenosti	63
9.3	Příprava reflexní sítě	63
9.4	Metodika měření	64
10	Závěr	68
11	Literatura	69
12	Přílohy	71

1 Úvod

Detektor RICH-1 (dále jen RICH-1), který je umístěn ve vědecko výzkumném středisku CERN slouží k zachycení informace o průletu urychlené částice. Z důvodů malých rozměrů částic je měření velmi náročné na přesnost. Jakékoliv sebemenší odchylky by již mohly způsobit velké nepřesnosti a mohly by vést ke znehodnocení celého měření. Z toho vyplývá, že systémy a prvky detektoru musí splňovat nejprísnější požadavky na kvalitu materiálů, čistotu prostředí, nastavení jednotlivých komponent podle předem určených parametrů atd.

Jedním z takových systémů je i soustava (mozaika) šestiúhelníkových a pětiúhelníkových sférických zrcadel. Zrcadla na sebe přesně navazují a dohromady vytváří jedno velké sférické zrcadlo o aktivní ploše 21 m^2 . Detektor je po většinu roku uzavřen. Během měření nelze zajišťovat stálou teplotu okolí. Vzhledem k vnějším činitelům (vibracím v detektoru, změnám teplot a změnám hydrostatického tlaku), dochází k nežádoucímu vzájemnému posunutí zrcadel vůči sobě, které nelze v průběhu roku nijak ovlivnit ani korigovat.

Ze všech těchto a více informací o detektoru, není lehké zajistit správné nastavení a natočení zrcadel. Pokud se neprovádí měření, tak se přistupuje k pravidelné roční kontrole a k případné úpravě nastavení jednotlivých zrcadel. To ale nestačí. Jsou kladeny stále větší požadavky na přesnosti měření a nastavování zrcadel i v průběhu chodu urychlovače částic a právě touto problematikou se zabývá tato diplomová práce.

Během předchozích let bylo navrženo několik systémů, které by mohly splňovat nejnáročnější požadavky na měření vychýlení zrcadel v kterémkoliv čase – tedy i při chodu urychlovače. Byl vybrán systém zaručující přesnost měření a hlavně lepší technickou realizovatelnost. Na zrcadla se promítá přesná pravoúhlá síť, kterou monitorují fotoaparáty. Vyhodnocení přesnosti vzájemného naklonění zrcadel spočívá v přesné návaznosti obrazu sítě na zrcadlech.

Tato diplomová práce má za úkol navrhnout a otestovat parametry jednotlivých komponentů monitorovacího systému (fotoaparáty, objektivy, síť, osvětlení sítě), navrhnout metodu pro určení odchylek zrcadla přímo z vyfoceného obrazu a zároveň provést simulace a měření pro každé zrcadlo. Z důvodů uzavřenosti detektoru je třeba všechny testy a simulace provádět mimo detektor.

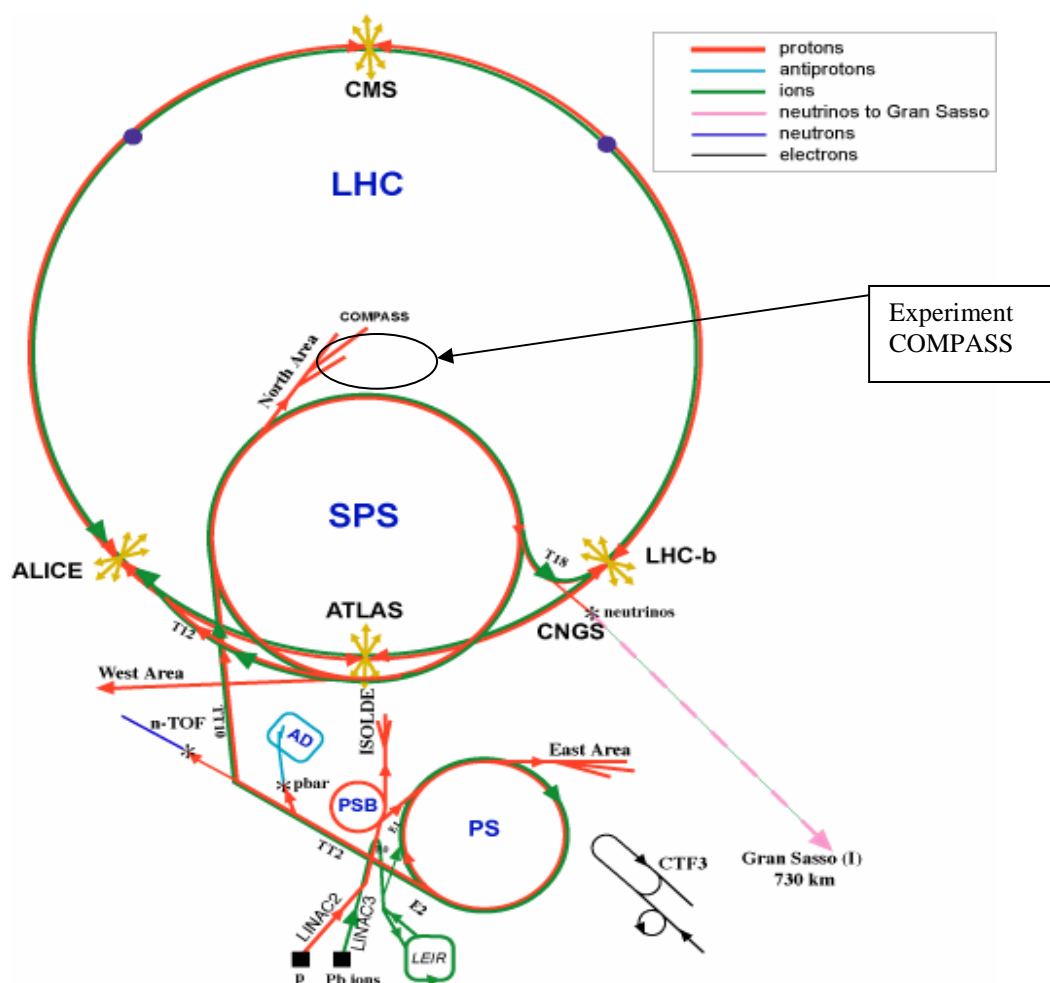
V laboratoři bylo proto nutno vytvořit podmínky, které co nejlépe přibližovaly situaci v detektoru. Součástí práce byla také spoluúčast na realizaci monitorovacího systému v RICH-1.

V první části diplomové práce jsou uvedeny technické informace o kolaboraci COMPASS a o RICH-1 se stručným popisem jejich funkce. V druhé části jsou uvedeny informace o navrženém monitorovacím systému a o parametrech zrcadel a jejich uchycení. Na tyto kapitoly navazuje ve třetí části – výběr fotoaparátu s objektivem, jejich testování a také výběr a testování sítě. Nejdůležitější poslední část - měření ve fyzikální laboratoři, kde byly simulovány samotné polohy a odchylky jednotlivých zrcadel vůči fotoaparátu, aby parametry odpovídaly přesnému umístění v RICH-1 a tím se zkalibrovala celá měřicí metoda.

2 COMPASS – experiment v CERN

(COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)

COMPASS je v současnosti jedním z nejdéle probíhajících experimentů výzkumného centra částicové fyziky CERN (European Organization for Nuclear Research). Využívá částic z urychlovače SPS (Super Proton Synchrotron), což je urychlovač částic, který dodává svazek polarizovaných hadronů.



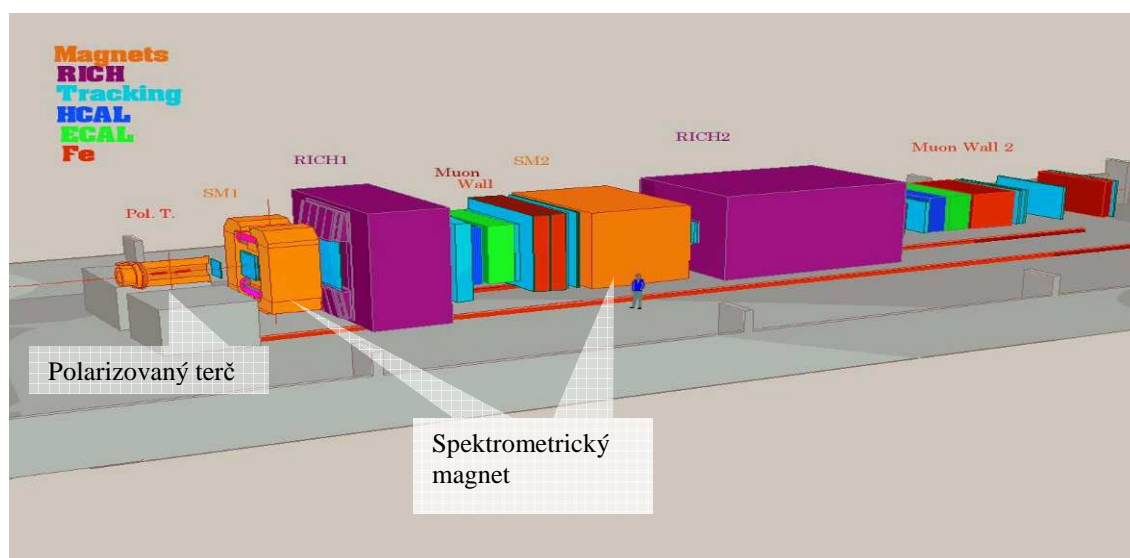
Obr. 1: Schéma CERN

Smyslem experimentu COMPASS je studovat hadronovou strukturu a spektroskopii pomocí interakcí urychlených částic. Experiment se snaží ověřit matematické teorie, popř. zjistit princip a složení vnitřní struktury a SPINU nukleonů .



Obr. 2: Základní představy o struktuře a spinu nukleonů, které se snaží ověřit experiment COMPASS. Každý nukleon by se měl skládat z kvarků, které podle dosavadních teoretických předpokladů udávají SPIN.

COMPASS se skládá z polarizovaného terče, z různých typů identifikačních systémů (detektory částic) a ze spektrometrických magnetů. V polarizovaném terči dochází ke srážkám urychlených částic z urychlovače SPS s plynem Li_6D . Nukleony v terči jsou polarizovány na určitou úroveň a je v něm udržována stálá teplota 5mK. Spektrometrické magnety slouží k nasměrování nabitých částic a detektory částic umožňují přesné zaznamenání částice v prostoru a čase, např. elektromagnetický a hadronový kalorimetr pro odhalení mionů a RICH detektor zaznamenává a identifikuje jakýkoliv druh prošlé částice [1], [2], [5].



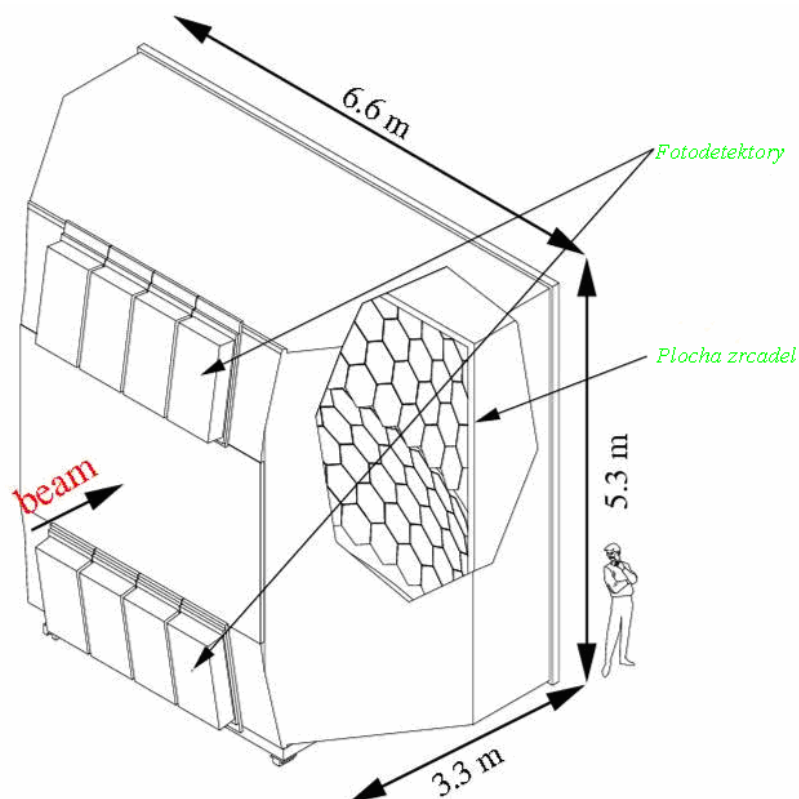
Obr. 3: Schéma COMPASSu [2].

3 RICH-1

(Ring Imaging Černekov)

Ze známého momentu detekované částice usměrněné v jiném detektoru je možné dostat informaci o průletu částice právě v RICH-1.

Existuje více detektorů RICH-1 pracujících např. v experimentech ALICE, LHCb apod.. V této diplomové práci se budeme zabývat pouze jedním detektorem RICH-1, a to ten který je součástí kolaborace COMPASS v CERN(obr.4).

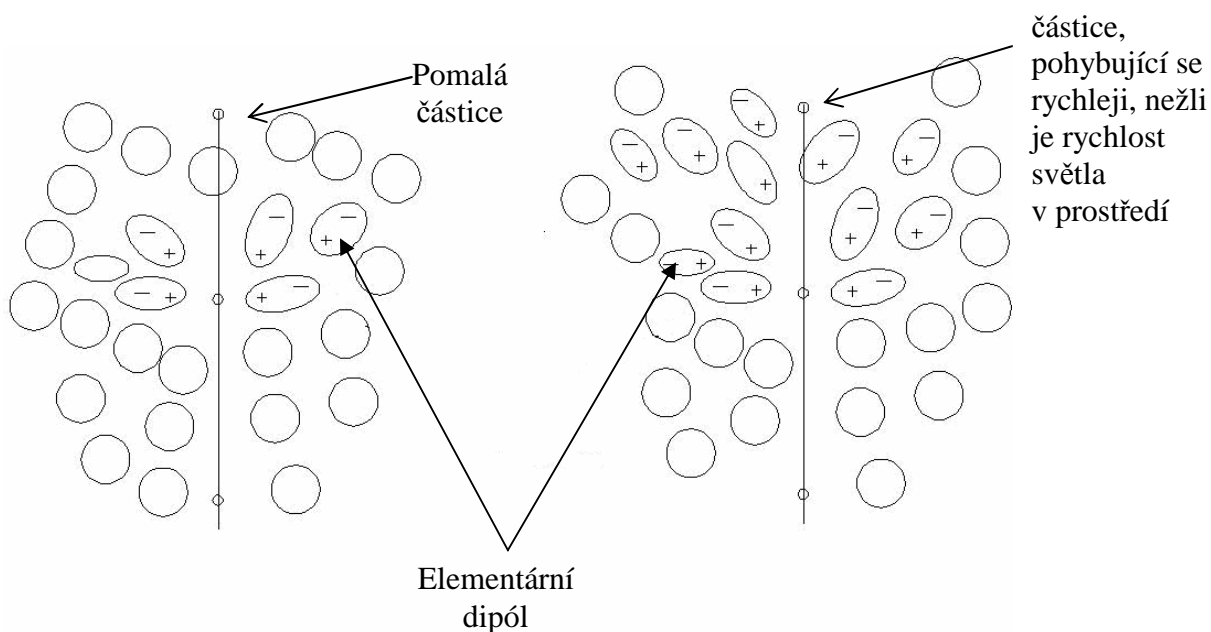


Obr. 4: Detektor RICH-1

3.1 Princip činnosti RICH-1

RICH-1 detektory částic jsou typy detektorů pracující na principu snímání Čerenkovova záření. RICH-1 se skládá ze soustavy zrcadel a fotodetektorů (většina plochy detektorů jsou drátkové detektory a část je pokrytá fotonásobiči). Celý detektor je naplněný plynem C_4F_{10} sloužící jako aktivní médium, které vytváří Čerenkovovo záření.

Měření nabitých částic je závislé na **Čerenkovovu efektu**: „pohybuje-li se částice v optickém prostředí rychleji, než je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření, které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než světlo“. Typicky lze Čerenkovův efekt pozorovat v nádržích jaderných reaktorů, kde se uranové palivo nachází v kapalině moderující neutrony, a voda působením záření gama získává modravý nádech. Částice procházející rychleji než světlo způsobí polarizaci prostředí [2], [5].



Obr. 5: Princip polarizace při Čerenkovova efektu

Polarizované atomy zobrazené na obr.5 vybudí díky interferenci Čerenkovovo záření, které vytvoří kuželovou vlnoplochu, která s osou dopadu částice svírá úhel θ viz obr.6 . Úhel θ se získá ze vzorce:

$$\cos \theta_C = \frac{1}{n(\lambda)\beta} + \left(\frac{\hbar}{\lambda p} \frac{n^2 - 1}{2n^2} \right) \quad (1)$$

kde: $\beta = \frac{c}{v}$

c - je rychlost světla ve vakuu

Protože $|\cos \theta_C| \leq 1$ je jev, který se vyskytuje jenom pro určitou rychlost, tudíž energetický

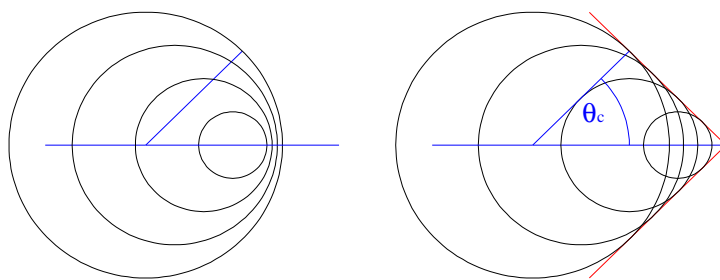
práh je:

$$\gamma_t = \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Kde: $\gamma_t = \frac{E}{mc^2}$

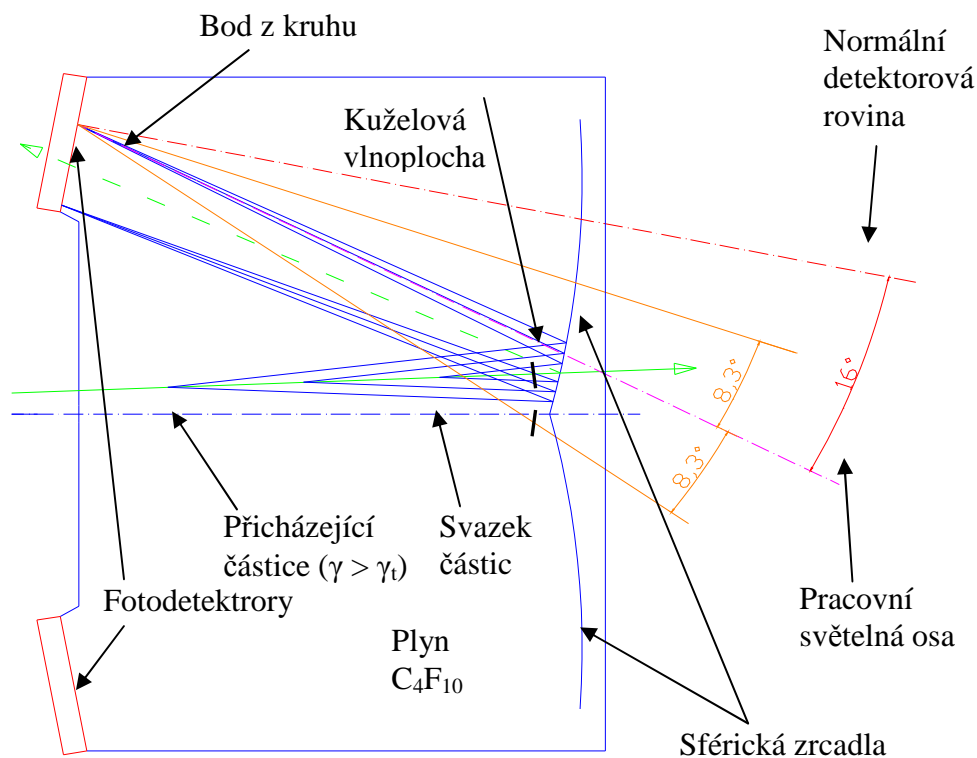
m - hmotnost

E - energie částice



Obr. 6: Vlnoplocha určená Huygensovým principem pro $\gamma < \gamma_t$ část vlevo a $\gamma > \gamma_t$ část vpravo – souvislá kuželová vlnoplocha [1]

Čerenkovovo záření nějak zaznamenat. Proto je v RICH-1 umístěna soustava sférických zrcadel od kterých se Čerenkovovo záření odráží pod určitým úhlem a systém fotodetektorů, které odražené Čerenkovovo záření zaznamenává (viz obr. 7).



Obr. 7: Schéma principu činnosti RICH detektoru s Čerenkovovým zářením. Kužel (modrý) se transformoval do kruhu na plochu fotonásobičů, který je centrován kolem virtuální částice (zelená). Úhel akceptance je znázorněn oranžovou barvou [1].

Měření hmotnosti je prováděno obvykle s přesností :

$$\left(\frac{dm}{m}\right)^2 = \left(\gamma^2 \frac{d\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{dp}{p}\right)^2 \quad (3)$$

Hybnost p je relativně dobře měřitelná tak, že rozlišení částic o hmotnosti m_1 a m_2 vyžaduje rozlišení relativních rychlostí $\Delta\beta$:

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} \cong \frac{m_1^2 - m_2^2}{2p^2} \quad (4)$$

3.2 Popis jednotlivých částí detektoru RICH-1

Detektor byl navržen pro identifikaci hadronů až do výkonu $\sim 60\text{GeV}/c$. Úhel snímání částic je ± 250 mrad vodorovně a ± 180 mrad ve svislé rovině. Identifikační plocha se skládá z osmi částí mnohokanálových drátkových detektorů fotonů (**MWPC**) s velkou plochou CsI fotokatody, umožňující detekci samotného fotonu. Uprostřed detekční plochy byly MWPC nahrazeny multikanálovými fotonásobiči. Citlivá oblast detekce fotonů pokrývá celkem $5,3\text{ m}^2$.

Zrcadla jsou koncipována tak, aby odrazila přicházející Čerenkovovo záření přesně na plochu kde se nachází fotodetektory. Z toho vyplývá požadavek přesného umístění všech součástí RICH-1, ale hlavně přesného nasměrování zrcadel na fotodetektor, jak je vidět na obr.7 .

Na soustavu zrcadel upevněnou v držácích (obr. 9, obr. 11), působí ovšem celá škála vnějších vlivů, z nichž největší je vibrace, teplotní dilatace materiálu a změny atmosférických tlaků. Zrcadla se vůči sobě mírně posunují a tak zhoršují přesnost měření což je nežádoucí. Z toho plyne potřeba sledovat odchylky v natočení zrcadel a případně je korigovat podle žádaných hodnot .

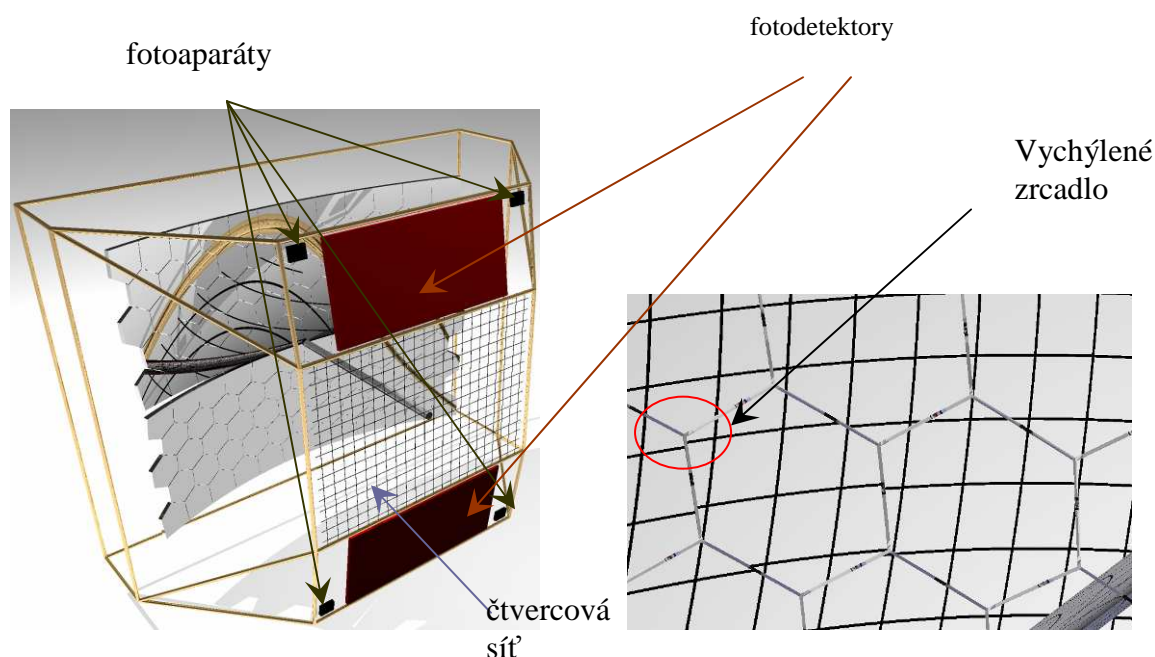
4 Systém pro sledování zrcadel

Jak již bylo v předchozím odstavci naznačeno, soustavu zrcadel je nutné neustále monitorovat a zajišťovat správné nastavování všech zrcadel.

Možnost sledovat vychýlení zrcadel umožňuje více systémů – např. teodolitem v autokolimačním režimu. Po zvážení všech možností a podmínek které RICH-1 poskytuje,

bylo rozhodnuto použít systém, který navrhl Sergio Costa - promítání čtvercové sítě na plochu zrcadel a optickými snímači sledovat přesnost zobrazené sítě tzn. přesnost nastavení zrcadel [3], [13]. Výhoda tohoto systému spočívá v jeho možnosti monitorování všech zrcadel současně a v dobré realizovatelnosti. Velkou výhodou je také možnost softwarové korekce nepřesností zrcadel oproti mechanickému nastavování.

Navržený snímací systém je vybaven čtyřmi fotoaparáty, které jsou umístěny v rozích přední části detektoru a s čtvercovou sítí, která se promítá na zrcadla. Jediná reálná možnost umístění fotoaparátů, z důvodů nedostatku místa, je vedle fotodetektorů (obr. 8). Podle obr.8, bylo také třeba ověřit umístění sítě tak , aby fotoaparáty snímaly na každém zrcadle část příslušné sítě.



Obr. 8: Návrh umístění fotoaparátů a čtvercové sítě. Ukázka modelu vychýleného zrcadla, jak by to měl zaznamenávat fotoaparát [3], [13].

4.1 Technické parametry zrcadel a jejich uchycení

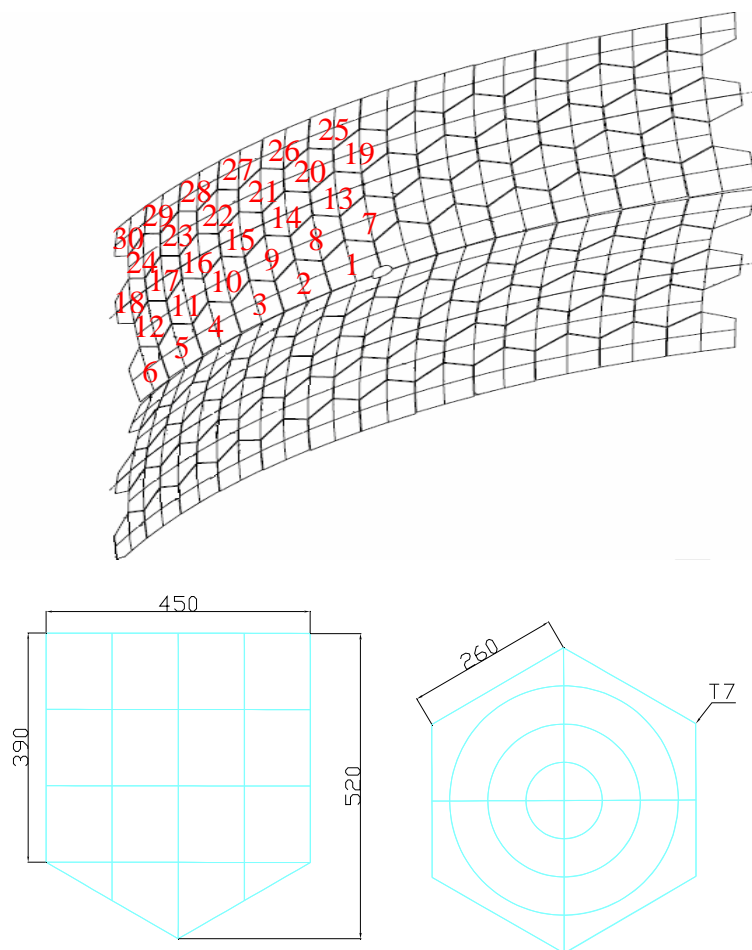
Pro navrhnutí a simulování celého monitorovacího systému je potřeba znát přesné rozměry detektoru a parametry zrcadel.

Uvedená mozaika zrcadel se skládá ze 116 sférických zrcadel, všechna zrcadla mají stejné optické parametry i stejné velikosti - 68 šestiúhelníkových a 48 pětiúhelníkových o maximální ploše 21m^2 . Celá plocha zrcadel se skládá ze dvou sférických částí, které jsou vychýleny od svislé osy o 5° [3], [13].

Poloměr křivosti je: $R = 6600\text{mm} \pm 1\%$

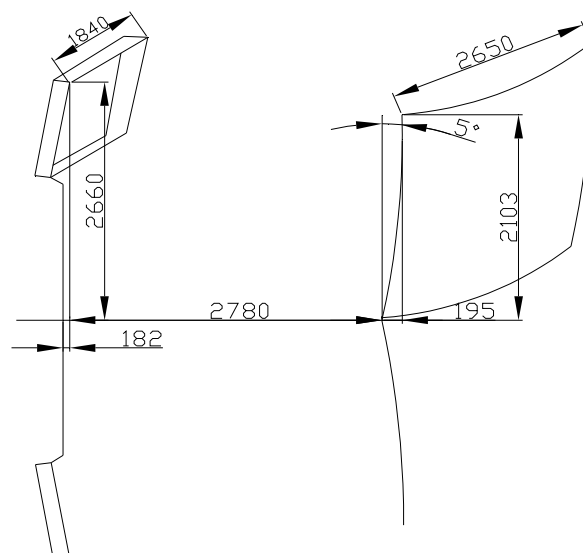
Ohnisková délka: $f = R/2 = 3300\text{m}$

Odrazivost: $r > 50\%$ (160-200 nm)



Obr. 9: V horní části je ukázka plochy zrcadel a jejich číslování V dolní části jsou rozměry šesti a pětiúhelníkového zrcadla

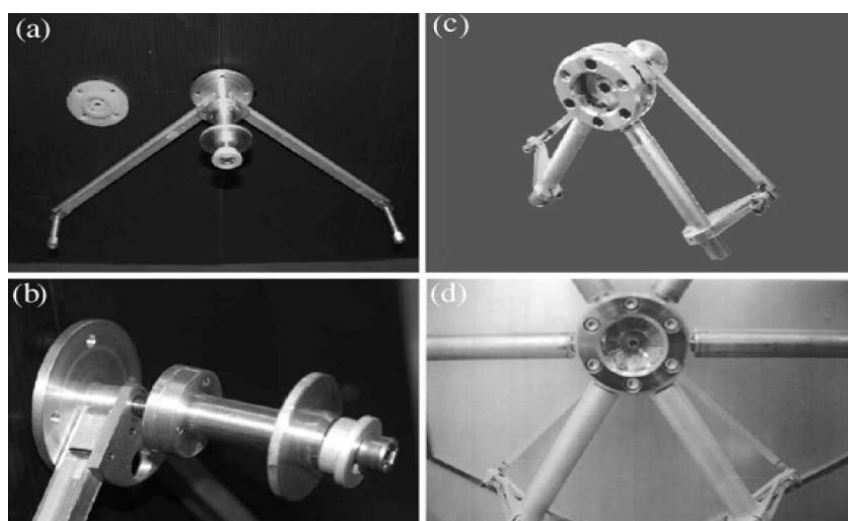
Rozměry plochy zrcadel a hodnoty umístění od fotodetekční plochy jsou na obr. 10.



Obr. 10: Rozměry jedné čtvrtiny RICH-1

Na základě těchto známých rozměrů plochy zrcadel a vzdáleností detektorů je již možno navrhnout snímací systém, který by monitoroval celou plochu zrcadel a dále aby snímal obraz v dostatečně kvalitním rozlišení, z důvodů ostrosti obrazu.

Uchycení zrcadel je realizováno tak, aby se dalo provádět nastavení jednoduše a přesně. Zrcadla jsou nalepená na otočném kloubu, jehož vychýlení lze přesně nastavovat dvěma rameny. Nastavování tohoto systému držáku je možné s přesností 0,1 mrad [3], [13].



Obr. 11: a) ramena pro natáčení zrcadla, b) detail kloubu pro natáčení, c) celý držák, d) uchycení zrcadla.

Uchycení zrcadla se skládá z kloubu umožňující pohyb do všech úhlů (obr.11b). Pohyb pro vychýlení kloubu se zrcadlem zajišťují natáčecí ramena (obr. 11a). Zrcadla jsou na držácích nalepena

5 Výběr monitorovacího zařízení

5.1 Výběr fotoaparátu

Při výběru monitorovacího zařízení pro snímání zrcadel, je třeba respektovat podmínky a technické omezení v RICH-1 a brát v úvahu všechny požadavky na kvality obrazu, které jsou zapotřebí pro jeho zpracování.

Požadavky na monitorovací zařízení:

- kvalita obrazu musí splňovat ty nej přísnější požadavky, tzn. fotoaparát musí mít co nejlepší rozlišení, aby mohlo být později užito co přesnějšího elektronického zpracování na počítači (vyhodnocování a korekce nepřesností),
- obraz musí mít co nejlepší ostrost zobrazení a snímací systém musí být schopný zároveň snímat celou plochu zrcadel na relativně malé vzdálenosti (zajistíme vhodným výběrem objektivu)
- musí být možnost připojení fotoaparátu k počítači a ovládání přes počítač,
- vybavení možností napájení fotoaparátu zdrojem zvenčí,

Po zvážení všech požadavků na snímání obrazu byl navržen fotoaparát **CANON EOS 5D**, který splňuje veškeré podmínky, jak na rozlišení obrazu, tak na technické zabezpečení.

5.1.1 Parametry fotoaparátu CANON EOS 5D

Tělo je vyrobeno z lehké hořčíkové slitiny a plastu, přičemž design se drží tradice digitálních (DSLR) zrcadlovek Canonu. Rozměry fotoaparátu jsou: 152 x 113 x 75 mm a hmotnost je cca 810 g. Fotoaparát nemá interní blesk, což ale není podstatné, protože osvětlení sítě bude samostatně umístěno vedle fotoaparátu – viz. kapitola 7.



Obr. 12: CANON EOS 5D

Jednou z nejzajímavějších a pro nás nejužitečnější funkcí uvedeného fotoaparátu je CMOS snímač o velikosti 35,8 mm x 23,9 mm (cca velikost kinofilmového políčka). Jeho efektivní rozlišení je 12,8 Mpix, což v kombinaci s velikostí snímače umožňuje použití poměrně velkých snímacích buněk, které mají 8,2 μm x 8,2 μm . To umožňuje mimo jiné i dosažení lepších výsledků v práci s digitálním šumem a dynamickým rozsahem.

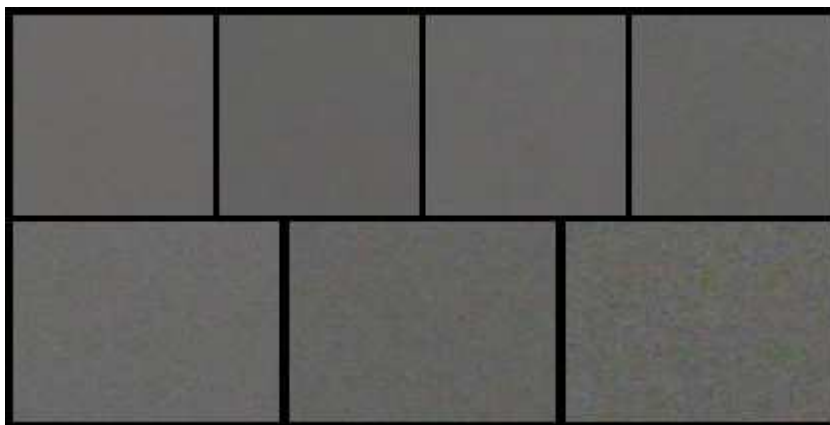
- Maximální rozlišení snímků, které s 5D lze pořídit, je tedy 4 368 x 2 912 bodů. Jinak můžeme také fotografovat do rozlišení 3 168 x 2 112 a 2 496 x 1 664 bodů. Snímky můžeme ukládat ve formátech JPEG a RAW. Možný je i záznam obou formátů najednou, RAW je ale dostupný pouze pro max. rozlišení. Citlivost lze nastavit na ISO 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 640, 800, 1000, 1250 a 1600 s možností rozšíření na ISO 50 a 3200. Není pochyb o tom, že 12,8 Mpix, navíc v kombinaci s full frame formátem, je vynikající rozlišení, daleko za hranicí střední třídy digitálních fotoaparátů. Platí čím více Mpix, tím větší fotografii je možné vytisknout a hlavně tím více můžeme na počítači obrázek přiblížit a zkoumat nepřesnosti. Velké rozlišení má ale i své nevýhody – zabírají hodně místa v paměti počítače, a proto budeme také potřebovat počítač s velkým prostorem na disku.
- Pro účely focení v této diplomové práci má CANON 5D na levém boku čtveřici konektorů ukrytou pod gumovou krytkou. Připojit je možné USB a A/V kabely, drátovou spoušť a synchronizaci blesku. V pravém boku je slot paměťové karty, chráněný obyčejnými plastovými dvířky. Spodní strana nabízí kovový závit stativu, umístěný v ose objektivu a prostor pro akumulátor [8], [9].



Obr. 13: Detail vstupů.

5.1.2 Kvalita snímku

Při vyhodnocení parametrů snímače můžeme předpokládat dobré výsledky v oblasti digitálního šumu. To se při testech také potvrdilo, Canon 5D má velmi dobré ukazatele v oblasti šumu. Ještě při citlivosti ISO 400 jsou snímky bez viditelného šumu a velmi podobné je to i na ISO 800. Lehký šum vystupuje na ISO 1600, ale ve srovnání s DSLR zrcadlovkami s APS-C snímačem je to stále velmi dobré. Viditelnější barevný šum s jemným zrnem vystupuje na citlivosti ISO 3200, ale snímky jsou stále použitelné. Takové snímky nejsou příliš vhodné pro tisk na velký formát, ale díky vysokému rozlišení je zde stále prostor pro softwarové úpravy [8], [9].



Obr. 14: Porovnání šumu na neutrálně šedé při citlivosti (zleva doprava a shora dolů: ISO50, 100, 200, 400, 800, 1600 a 3200), výřezy 1:1 z barevného testovacího terče [8], [9].

5.1.3 Výhody a nevýhody Canon EOS 5D

Výhody

- Vynikající rozlišení 12,8 Mpix
- Full frame (plné filmové políčko) formát senzoru, všechny objektivy bez přepočtu
- Malé a lehké tělo (ve srovnání s 1D a 1Ds) leč stále robustní a odolné
- Velký a jasný displej, rychlé a pohodlné prohlížení fotografií
- Vynikající jasný a velký hledáček
- Vynikající kvalita obrazu, nízký šum i při ISO 1600 a 3200

- Rychlá reakce na spoušť, rychlý start z režimu spánku (fotoaparát není třeba prakticky vůbec vypínat)
- Možnost RGB histogramu
- Lepší TTL měření expozice, na rozdíl od 20D nemá 5D tendenci přepalovat světla
- Cena fotoaparátu je 100 000Kč což je pro tak kvalitní přístroj poměrně cenově nenáročné

Nevýhody

- Pomalé ostření
- Absence vestavěného blesku
- Bez externího blesku neostří ve tmě
- Nutnost použít kvalitní full frame objektivy

Uvedené nevýhody nemají žádný vliv na výsledky zobrazení proto se jimi nebudeme dále zabývat

5.2 Výběr objektivu

Při výběru objektivu je důležité položit si otázky – *co, jak a proč budeme fotografovat?* čím kvalitnější tělo DSLR (digitální zrcadlovka) s vyšším rozlišením u uvedeného fotoaparátu, tím i vyšší nároky na objektiv. Nasadit na DSLR za 100 000 Kč objektiv za 4 000 Kč je znehodnocení investice do fotoaparátu! Nároky na objektiv při focení na výstavu fotografií (každá o velikosti 1x2 m) budou jiné než při focení na obálku časopisu A4 nebo při focení do rodinného alba 10x15 cm nebo dokonce při prohlížení na VGA monitoru 800x600 bodů!

Pro práci s obrázky při sledování nepřesností polohy zrcadel budeme potřebovat, jak již bylo uvedeno v kapitole 5, digitální fotografie s co nejlepším rozlišením (zaručuje Canon 5D) a tudíž i pro práci s obrázky monitor podporující co nejkvalitnější rozlišení [8], [9]

5.2.1 Vlastnosti potřebné pro výběr objektivu

- Na Canon EOS 5D patří výhradně objektivy konstruované pro **plné filmové políčko** (full frame). Nicméně není to jediná podmínka. Je třeba si uvědomit, že vzhledem k 12,8 Mpix rozlišení je velikost jednoho pixelu cca 0,0082 mm. Nasadit tedy na EOS 5D objektiv neschopný takové kresby v celém obrazovém poli je znehodnocení investice a pasování

EOS 5D na průměrný 6Mpix fotoaparát. Z tohoto důvodu k EOS 5D patří objektivy Canon třídy "L", Sigma třídy EX, Tokina PRO atp.

- **Ohnisko f** objektivu definuje zorný úhel, který objektiv přenese na senzor. Jinými slovy ohnisko určuje výřez scény, který budeme zaznamenávat. Je všeobecně známo, že objektivy se dělí do dvou základních skupin - s proměnným ohniskem (tzv. zoomy) a s pevným ohniskem. V technických parametrech uváděné ohnisko objektivu platí při zaostření objektivu na nekonečno. Při zaostření na kratší vzdálenosti bude mít objektiv ohnisko vždy o něco delší.

Výběr ohniska má také velký vliv na celkovou kompozici obrazu a hloubku ostroty. Nejvyšší a nejsvětelnější jsou objektivy s pevným ohniskem, protože jejich konstrukční složitost, zejména počet vzájemně pohyblivých součástí, je o řád nižší než u objektivů s proměnným ohniskem.

Z hlediska ohniskové vzdálenosti lze rozdělit objektivy na:

- Rybí oka (8 mm) – extrémně širokoúhlé objektivy s úmyslnou deformací perspektivy
- **Širokoúhlé (10-30 mm) – interiéry, architektura, krajina, reportáž**
- Střední (základní) ohniska (30-100 mm) – základní objektivy, přirozené zobrazení, portrét
- Normální objektiv (50 mm) - odpovídá zornému úhlu lidského oka
- Teleobjektivy (100-300 mm) – portrét, reportáž, krajina
- Silné teleobjektivy (>300 mm) – příroda, sport
- Makroobjektivy – měřítko 1:1, liší se minimální zaostřovací vzdáleností
- Tilt-Shift – architektura (korekce sbíhání linií - „flašky“)
- Mirror – silné teleobjektivy (600 mm) konstruované na principu hvězdářského dalekohledu

Zorný úhel objektivu a jeho ohnisková vzdálenost jsou vázány jednoduchým pravidlem: "Čím delší ohnisko objektivu, tím menší zorný úhel" a konkrétně potom pro 35mm film s polovinou úhlopříčky detektoru 21,6 mm vztahem:

$$\text{Zorný úhel objektivu } [^\circ] = 2 * \arctg(21,6 / \text{Ohnisková vzdálenost [mm]})$$

V našem problému výběru objektivu víme, že je nutné snímat ve vzdálenosti 2 780mm plochu minimálně o rozměrech 2650mm x 2153mm a že snímací zařízení bude umístěno

pevně v rámu detektoru viz 4.1. Z toho vyplývá, že je třeba širokoúhlý objektiv s pevným ohniskem. Ke zjištění ohniska pro objektiv ze zadaných rozměrů je třeba vědět, že zorný úhel by měl být minimálně 51° pro nejdelší horizontální rozměr zrcadel. Proto místo rozměru 21,6 pro úhlopříčku detektoru je použit rozměr 17,95 pro nejdelší horizontální rozměr detektoru. Ze vztahu pro zorný úhel jsem zjistil potřebnou ohniskovou vzdálenost:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg\left(\frac{17,95}{f}\right) [mm] \Rightarrow$$

$$f = \frac{17,95}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{17,95}{\operatorname{tg}\left(\frac{51}{2}\right)} = \underline{\underline{37,6\text{mm}}}$$

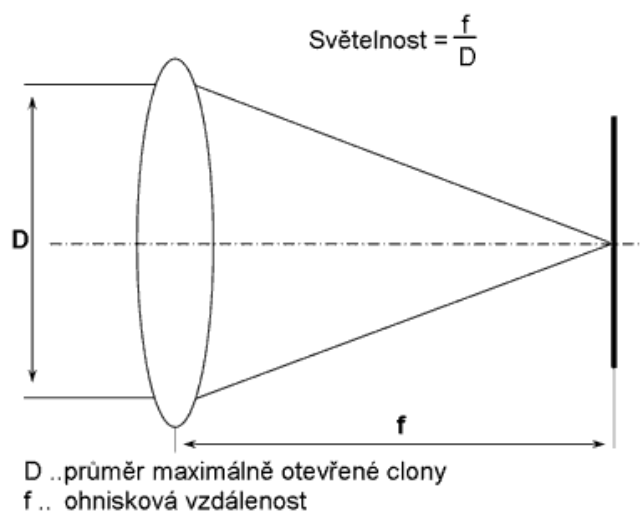
(5)

Kde: α - je zorný úhel

f – ohnisková vzdálenost objektivu

Nyní je zřejmé, že je třeba vybrat objektiv ze sady širokoúhlých objektivů s pevnou ohniskovou vzdáleností proto, že snímací zařízení bude umístěno pevně v rámu detektoru. Velikost ohniskové vzdálenosti by měla být menší než hodnota výpočtené ohniskové vzdálenosti, aby do zorného úhlu vešla celá plocha zrcadel. Z uvedených zjištění a výpočtů byl vybrán objektiv z řady ohniskových vzdáleností $f = 10\text{-}30\text{ mm}$.

- **Světelnost**, neboli minimální clonové číslo je klíčový parametr každého objektivu. Zjednodušeně řečeno udává, kolik světla je objektiv schopen dopravit na senzor. Fyzikálně je světelnost definována jako poměr ohniskové vzdálenosti ku průměru maximálně otevřené clony objektivu.



Obr. 15: Světelnost je definována jako poměr ohniskové vzdálenosti (f) ku průměru maximálně otevřené clony objektivu (D).

Proč je světelnost klíčovým parametrem objektivu vyjadřují následující informace:

- Fotografování za špatných světelných podmínek, kdy prodlužovat expoziční čas často nejde (hrozí rozhybání snímku) a zvyšování ISO citlivosti dramaticky zhoršuje kvalitu fotky. Světelný objektiv umožní dopravit na senzor více světla a tím zkrátit expoziční čas, či udržet rozumnou ISO citlivost.
- Clona je jediný parametr, který určuje **hloubku ostrosti** snímku bez vlivu na jeho kompozici. Pro snímky s malou hloubkou ostrosti je potřeba světelný objektiv. Zvláště širokouhlé objektivy mají z fyzikálního principu svojí přirozenou velkou hloubku ostrosti a tak při požadavku na rozostřené pozadí je minimální clonové číslo čili světelnost jediným způsobem jak toho dosáhnout.
- Všechny DSLR používají standardně tzv. pasivní ostřicí systém, kdy ostří na základě toho, co zobrazí objektiv, a tedy "vidí" ostřicí senzor. Je přirozené, že každá DSLR bude se světelným objektivem ostřit za špatného světla mnohem lépe než s objektivem s nízkou světelností. Ostřicí senzor prostě uvidí lépe.
- Kvalita a jasnost obrazu v hledáčku je další parametr, který světelnost objektivu ovlivní. Obraz v hledáčku bude se světelným objektivem mnohem jasnější než s objektivem s nízkou světelností.

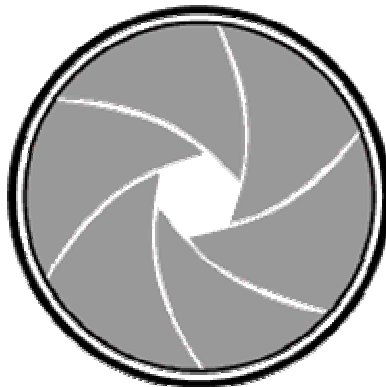
V technických parametrech je světelnost objektivu rovněž uváděná při zaostření objektivu na nekonečno. Při zaostření na kratší vzdálenosti bude mít objektiv světelnost vždy horší. Tato skutečnost je významná u makroobjektivů, jenž při zaostření na extrémně krátké vzdálenosti, při kterých dosahují požadovaného měřítka snímání 1:1, dramaticky ztrácejí světelnost!

Při výběru objektivu v podmínkách detektoru volíme samozřejmě z nejsvětelnějších dostupných objektivu. Pevná ohniska dosahují světelnosti až $f/1,8$ až $f/1,2$.

Světelnost se dá dále měnit snížením clonového čísla 2x (např. z 5,6 na 2,8) zvýší množství dopraveného světla na senzor 4x, a tudíž umožní i 4násobné zkrácení expozičního času [8], [9].

- **Clona** je v podstatě stínítko s proměnným kruhovým otvorem regulující množství světla procházejícího objektivem. Ideální clona by měla přísně kruhový tvar a nulovou

tloušťku aby nedocházelo k rozptylu (difrakci) světla. Reálná clona je zkonstruována z tenkých kovových lamel, které vytvoří jen přibližně kruhový tvar. Počet lamel clony a její celková konstrukce se tak může projevit v ostrosti obrazu, způsobu rozostření objektů mimo hloubku ostrosti a v odlescích ("prasátkách") při snímání v protisvětle.

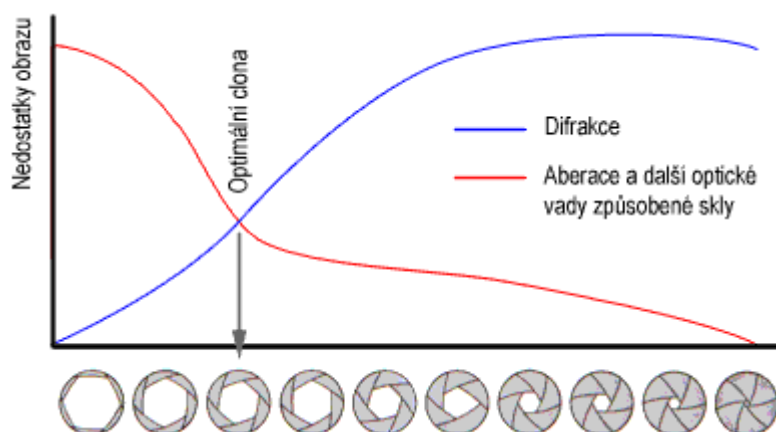


Obr. 16: Typická konstrukce clony objektivu.

- **Maximální clonové číslo (minimální clona).** Maximální clonové číslo udává, jak moc dokáže objektiv uzavřít otvor clony a bránit se tak světlu. Pro běžnou práci je to celkem nepodstatná veličina, ale pro náš případ velice důležitá. Potřebujeme totiž maximální hloubku ostrosti, která se dosáhne právě při maximálním clonovém čísle. Maximální hloubka ostrosti je často nutná u makrofotografie, protože při snímání na krátké vzdálenosti je obecně hloubka ostrosti velmi malá.

Běžné objektivy dosahují maximálních clonových čísel kolem $f/22$ až $f/32$. Makroobjektivy z výše uvedeného důvodu dosahují maximálních clonových čísel často i $f/45$. U takto vysokých clonových čísel je ale nutné počítat s viditelnou difrakcí obrazu, která se projeví jeho lehkým rozmazáním.

- **Optimální clona objektivu** - tento parametr nenajdeme v žádném katalogu, vychází však z obecných vlastností světla a setkáte se s ním u každého objektivu. Optimální kresby se dosáhne jen v určitém rozsahu středních clon - u hodně otevřených clon (směrem k světelnosti) bude kvalita klesat vlivem optických vad použitých skel, kdežto směrem k maximálně uzavřené cloně (vysoká clonová čísla) bude kvalita klesat vlivem rozptylu světla na lamelách clony při průchodu malým otvorem (difrakce).



Obr. 17: Ukázka nalezení optimálního clonového čísla

Difrakce a vady skel jdou při změně průměru clony proti sobě. Proto lze u každého objektivu nalézt optimální clonu z hlediska kresby. V praxi bývá někde kolem $f/8$.

V našem případě budeme předpokládat clonové číslo kolem $k = 4$ a $k = 16$ což by mohlo být dostačující [8], [9].

5.2.2 Difrakční limita hloubka ostrosti zobrazení

Aby fotoaparát s CCD snímačem poskytoval optimální obraz, ve kterém budou dobře pozorovatelné i nejmenší detaily, mělo by platit, že bod předmětu se objektivem zobrazí opět jako bod obrazu. To ovšem není možné.

Působením omezení dané vlnovou podstatou světla a ohybových jevů, nedokonalosti objektivu, není možné aby fotoaparát poskytoval optimální obraz – neplatí, že bod předmětu se opět zobrazí objektivem jako bod obrazu, ale jako malá ploška. Nejlepší detaily jsou na snímač promítnuty tehdy, když snímač bude umístěn právě v místě kde se vytváří obraz jehož poloha je dána zobrazovací rovnicí .

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (6)$$

a – předmětová vzdálenost

f – ohnisková vzdálenost předmětu

a' – obrazová vzdálenost

f' – ohnisková vzdálenost obrazu

Často je zapotřebí, aby se s fotoaparátem najednou snímaly objekty umístěné v různých vzdálenostech. V tom případě se musí objektiv nastavit tak, aby předměty v jistém rozsahu vzdáleností od objektivu byly promítnuty na snímač s přijatelným zhoršením rozlišení detailů.

Jestliže ohnisková délka objektivu je f' , průměr vstupní pupily je D_{vp} a je nastaveno geometrické clonové číslo objektivu k , bude průměr kroužku prvního minima D_{1min}

$$D_{1min} = 2,44k\lambda \quad (7)$$

Kde λ je vlnová délka promítaného zařízení. Největší část světelného toku bude však soustředěna na ploše s polovičním průměrem.

S ohledem na tuto skutečnost se definuje tzv. *Airyho rozptylový kroužek*, pro jehož průměr platí:

$$u' = 1,22k\lambda \quad (8)$$

= **difrakční limit** – má v souvislosti s objektivem důsledek, že optická soustava nemůže do obrazu promítnout menší detaily, než určuje omezení dané vztahem (8).

Pro:

Vlnovou délku $\lambda = 660\text{nm}$

Clonové číslo $k = 16$

$$u' = 1,22k\lambda = 1,22 \cdot 16 \cdot 660 = \underline{\underline{13\mu\text{m}}}$$

Clonové číslo $k = 4$

$$u' = 1,22k\lambda = 1,22 \cdot 4 \cdot 660 = \underline{\underline{3\mu\text{m}}}$$

Z těchto údajů už můžeme vypočítat hloubku ostrosti zobrazení - nejmenší zadní a přední vzdálenost a_z , a_p .

Hloubka ostrosti zobrazení:

Jestliže při zobrazení připustíme, aby se vlivem nedokonalého zaostření bod na snímáči zobrazil jako rozptylový kroužek o průměru u' , bude nejmenší **zadní** vzdálenost od objektivu dána vztahem

$$a_z = \frac{a}{1 + \frac{ku'(a-f')}{f'^2}} \quad (9)$$

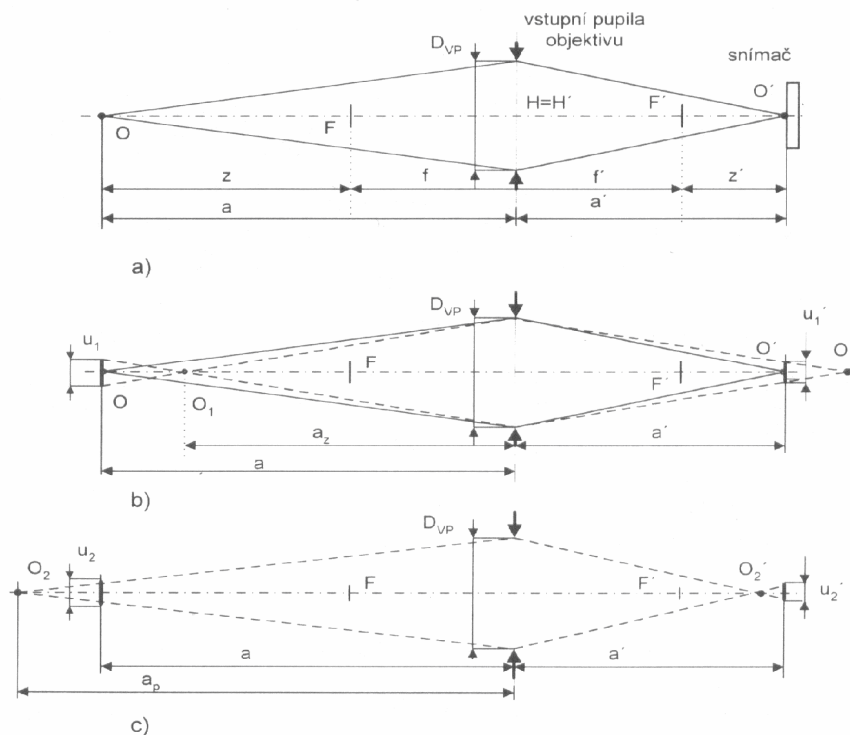
a největší **přední** vzdálenost od objektivu určena vztahem:

$$a_p = \frac{a}{1 - \frac{ku'(a-f')}{f'^2}} \quad (10)$$

=>hloubka ostrosti zobrazení závisí na nastaveném clonovém čísle k

$$\frac{D_{vp}}{f'} = \frac{1}{k} \Rightarrow k = \frac{f'}{D_{vp}} \quad (11)$$

Zacloněním objektivu se tak snižuje nejen vliv jeho chyb, ale současně se zvyšuje hloubka ostrosti zobrazení. Zdálo by se, že je nejvýhodnější používat co největší clonové číslo. To však není správné vzhledem k působení ohybu světla na kruhovém otvoru (vstupní pupile) objektivu, čímž dochází ke snížení kvality zobrazení.



Obr. 18: Určení hloubky ostrosti zobrazení

Z obrázku vidíme, že postupuje-li předmět z nekonečna k zrcadlu, pohybuje se obraz od ohniska vstříc předmětu a setkají se ve dvojnásobné ohniskové vzdálenosti. Když se předmět pohybuje dále k ohnisku, postupuje obraz dále až do nekonečna. Ve všech těchto případech je a i a' záporné a tedy předmět i obraz je skutečný.

Pokud se předmět pohybuje od ohniska k zrcadlu, pohybuje se obraz z nekonečna za zrcadlem k zrcadlu. A když přijde předmět do vrcholu zrcadla, kryje se svým obrazem. Po celé této dráze je a' kladné a tedy obraz je neskutečný.

Tabulka 1

a	$-\infty$	2f	f	f/2	0-	0+	-f	$+\infty$
a'	f	2f	$\pm\infty$	-f	0+	0-	f/2	f

Ohnisková vzdálenost ve které se má předmět zobrazovat je přibližně 14m. Vzdálenost naší sítě od zrcadel je 3,2 m. Tudíž zobrazovaný obraz (sít') na zrcadlech bude neskutečný

$$a_z = \frac{a}{1 + \frac{ku'(a-f')}{f'^2}} = \frac{3200}{1 + \frac{16 \cdot 13(3200-3300)}{3300^2}} = \underline{\underline{3,206m}}$$

$$a_p = \frac{a}{1 - \frac{ku'(a-f')}{f'^2}} = \frac{3200}{1 - \frac{16 \cdot 13(3200-3300)}{3300^2}} = \underline{\underline{3,194m}} \quad [6]$$

5.2.3 Objektiv CANON EF 24 mm, f / 2.8

Ze všech předešlých informací o objektivě už bylo možné vybrat objektiv hodící se přesně pro naše účely monitorování zrcadel.

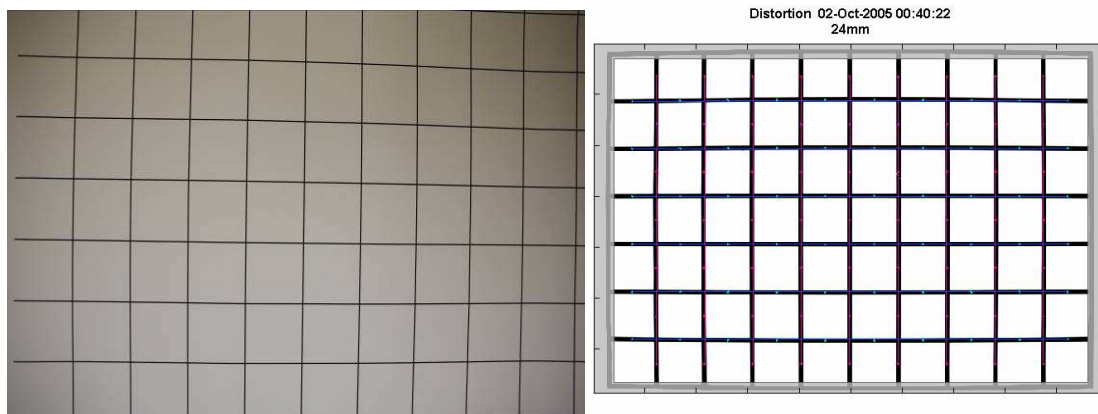
Byl vybrán objektiv CANON EF 24 mm, f/2,8. Objektivy s ohniskovou vzdáleností 24mm jsou vstupem k ultra-širokoúhlé fotografii.



Obr. 19: Ukázka vybraného objektivu CANON EF 24 mm, f/2,8

5.2.4 Testování objektivu

Nyní bylo třeba otestovat jakou má vybraný objektiv distorzi a porovnat s jinými objektivem viz obr. 20.



Obr. 20: Test distorze objektivu

Vlevo na obr. 20 je distorze pořízena ve fyzikální v laboratoři fotoaparátem CANON EOS 5D. Vpravo na obr. 20 je distorze objektivu pořízená fotoaparátem CANON EOS 350D [8], [9]. Vidíme, že distorze objektivu je vyšší než distorze stejného objektivu, který udávají tabulky. Je to dáno tím, že CMOS snímač u CANON 5D je širší, než u 350D.

Objektiv vyhovuje všem našim požadavkům jak na zorný úhel, tak i na světelnost objektivu. Je to objektiv konstruovaný přímo na digitální zrcadlovky, což určují písmenka „EF“. Tento objektiv je ideální, neboť je nesmírně ostrý a nabízí kvalitnější korekci lineárního zkreslení.

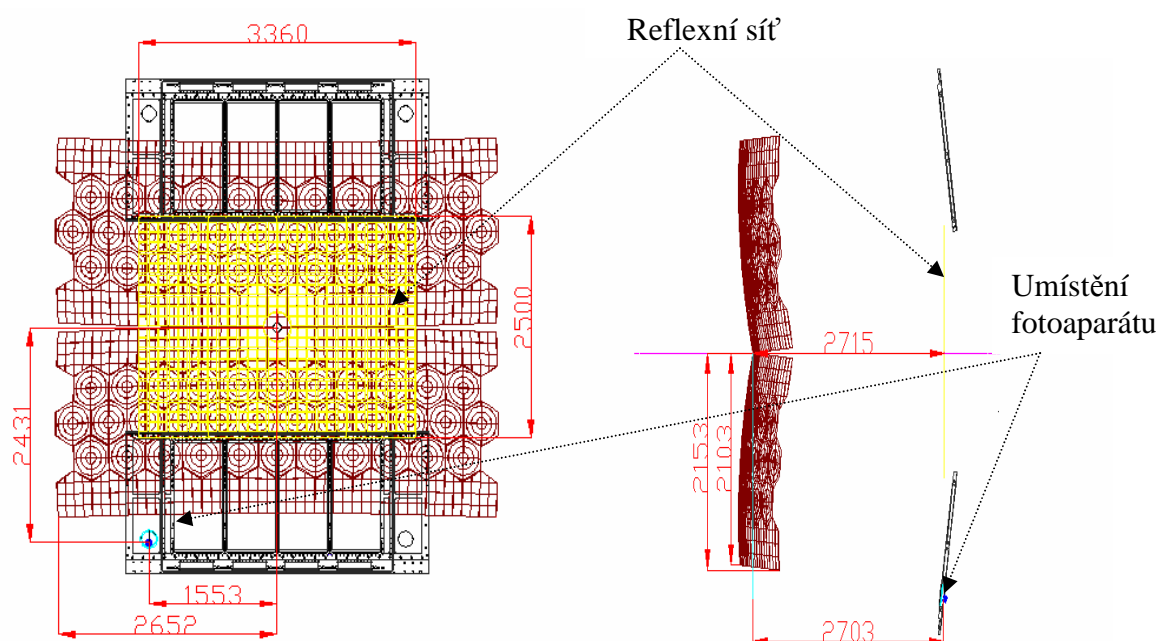
6 Vytvoření laboratorních podmínek

Před začátkem instalace zařízení do detektoru, bylo zapotřebí otestovat všechny komponenty monitorovacího systému v reálných podmínkách a simulovat posuny zrcadel. Úkolem tedy bylo navrhnout systém snímání tak, aby bylo možné prověřit celou soustavu zrcadel pomocí jednoho fotoaparátu a jediného zrcadla, které jsou v laboratoři k dispozici. Pro tento účel jsem v laboratoři katedry fyziky vytvořil systém, který dokáže pohybem fotoaparátu a zrcadla nastavit relativní polohy všech zrcadel vůči fotoaparátu tak, jak jsou nastaveny polohy zrcadel vůči fotoaparát v RICH-1.

6.1 Souřadnice fotoaparátu a sítě

První otázkou před započítím prací, bylo zapotřebí otestovat, zda se systém testování všech zrcadel vejde do fyzikální laboratoře. Proto k otestování posloužily simulace v programu ZEMAX.

Nejprve bylo důležité zjistit přesnou polohu fotoaparátu a sítě vůči středu souměrnosti zrcadla. Tento problém vyřešili italští kolegové, kteří provedli příslušné výpočty a měření. Vzdálenost fotoaparátu a sítě vůči středu souměrnosti zrcadel je na obr. 21.

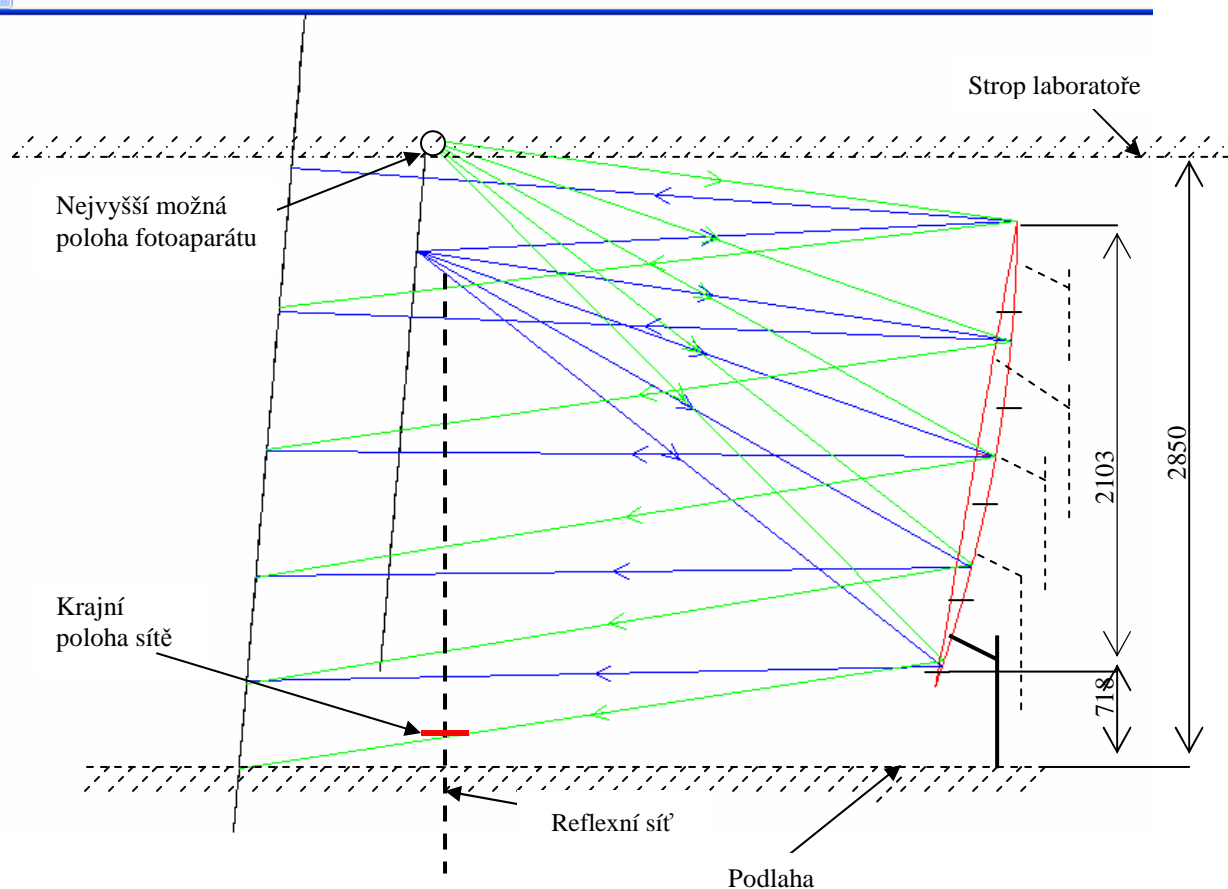


Obr. 21: Souřadnice vzdáleností fotoaparátu a sítě od zrcadel pomocí programu AutoCad.

6.2 Simulace v programu ZEMAX

Ze souřadnic na obr.21 již bylo možné vytvořit simulace v softwaru ZEMAX [10], tak aby bylo možné rozpoznat, kde se nám ukáže obraz na zrcadle. Tzn. zda všechny zrcadla zobrazí námi předkládanou síť viz. obr.22

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	2700.000000	V	1215.000000
STO#	Standard		-6600.000000	-3300.000000	MIRROR	1075.000000
IMA	Standard		Infinity	-		2000.000000



Obr. 22: Simulace zobrazení reflexní sítě v programu ZEMAX

Pět paprsků dopadá od fotoaparátu na sférickou plochu v místech, kde jsou zrcadla na výšku umístěny. Polohy zrcadel jsou naznačeny slabou čárkovanou čarou a dlouhá tučně čárkovaná čára znázorňuje reflexní síť (blíže viz. kapitola 7.1). Odražený paprsek v místě průchodu reflexní sítě označuje, jakou část reflexní sítě by jednotlivé zrcadla měly zobrazovat. Představu, jaký by byl obraz sítě při jiné vzájemné konfiguraci fotoaparátu a sítě, znázorňuje modrý paprsek. Ze simulace je patrné, že nejvzdálenější poloha (fotoaparát vůči nejspodnějšímu zrcadlu) nám reflexní síť nezobrazí. Vidíme, že pokud chceme zobrazit nejvzdálenější zrcadla od fotoaparátu, tak bychom museli probourat strop. Proto bylo třeba systém mírně pozměnit a předělat stojan na zrcadlo tak, abychom zrcadlo dostali co nejblíže k zemi a tím pádem posunuli celou aparaturu níž aby se nám zobrazila celá reflexní síť i na těch nejvzdálenějších zrcadlech.

6.3 Posuvná soustava pro modelování poloh zrcadel

Systém simulovaný v laboratoři se skládá z jednoho zrcadla a fotoaparátu s objektivem. Podstata simulace všech zrcadel pomocí jednoho spočívá v tom, že na pohyblivé konstrukci můžeme posunout fotoaparát do libovolné potřebné polohy vůči zrcadlu a na stojanu pro zrcadlo můžeme simulovat úhel jakéhokoliv zrcadla v RICH-1. Výhoda posunu fotoaparátu namísto zrcadla je v jeho jednodušší manipulovatelnosti.

Byl zakoupen shodný fotoaparát a objektiv, který je namontovaný v RICH-1. Dále bylo třeba zajistit zrcadlo, které by mělo stejné optické vlastnosti jako zrcadla použitá v RICH-1. Zajištění takového zrcadla se ukázalo být malým problémem, protože jsou to zrcadla s velice specifickými a přesnými vlastnostmi, které není jednoduché vyrobit. Náhodou do RICH-1 dodávala zrcadla firma COMPAS z České Republiky, tudíž nebyl problém výrobce požádat o vyrobení a dodání stejného zrcadla.

6.3.1 Konstrukce pro posun fotoaparátu

Pro posun fotoaparátu byla sestavena konstrukce, která má pohyblivé rameno s pojezdem, na němž je umístěný snímací systém. Konstrukce má za úkol posouváním fotoaparátu simulovat reálné polohy všech zrcadel. Konstrukce byla sestavena s panelů od firmy MOAS CS s.r.o. Na obr. 23 je vidět sestavenou celou konstrukci i se systémem pro naklápění fotoaparátu, což bylo třeba také zajistit tak, aby vše přesně odpovídalo montáži v RICH-1, kde je fotoaparát také mírně nakloněn.



Obr. 23: Konstrukce pro pohyb fotoaparátu a uchycení fotoaparátu s možností vychýlení

6.3.2 Stojan pro naklápění zrcadla

Pro naklápění zrcadla (simulace poloh všech zrcadel) bylo třeba vymyslet takový systém, který by umožňoval pohyb ve všech osách a zároveň natočení ve všech směrech. V navrhnutém systému jsou funkce posunů zajištěny následovně: fotoaparát se pohybuje v osách x a y a pohyb v ose z (viz. obr 51) je zajištěn pohybem zrcadla. Stojan na zrcadlo musí tedy zajišťovat pohyb v ose z a vychýlení do všech úhlů. Pro uchycení zrcadla jsem nakonec využil stojan pro dalekohled, který poskytl Jaroslav Polák. Zbývalo už jen vymyslet umístění a uchycení zrcadla na stojanu což bylo zajištěno rovněž konstrukcí od firmy MOAS CS s.r.o a uchycení vyrobil pan Rudolf Jäger.



Obr. 24: Stojan pro uchycení a vychýlení zrcadla

7 Testování jednotlivých částí systému

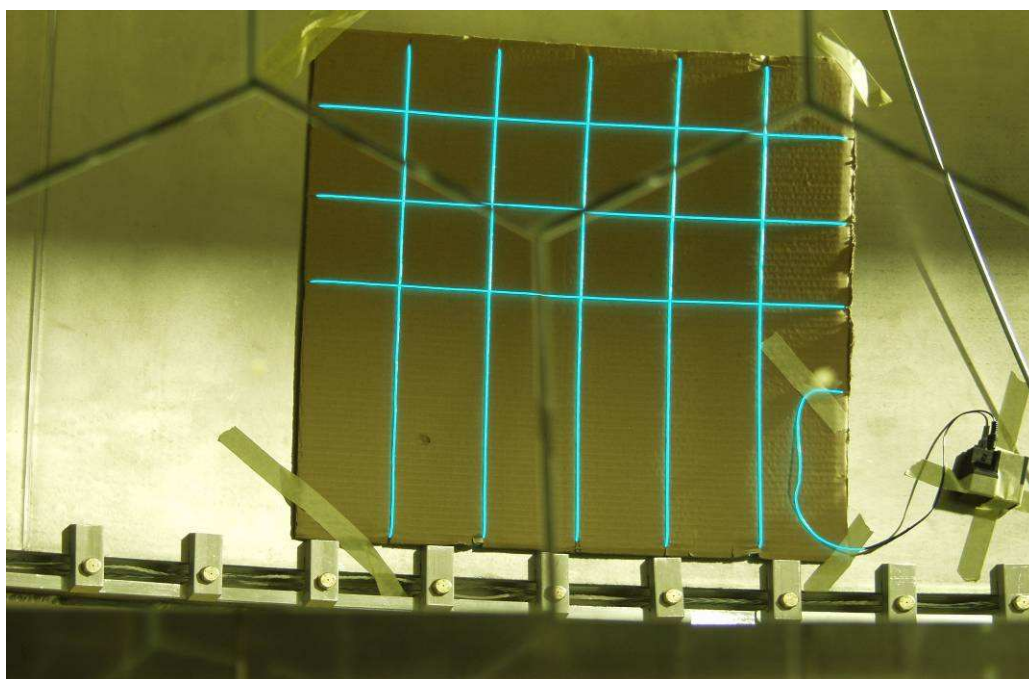
7.1 Pravoúhlá síť

Požadavků na síť, která se má zobrazovat na mozaiku zrcadel a má být snímána fotoaparátem, je celá škála a je třeba brát velký důraz na její výběr a testování.

7.1.1 Materiál sítě

RICH-1 je v průběhu měření uzavřený a utěsněný tak, aby do něj neprošlo žádné světlo. První otázkou je, z jakého materiálu zhotovit síť. Materiál musí být pevný, aby nedocházelo k jeho pohybu a hlavně musí být viditelný ve tmě.

Jeden z prvních návrhů bylo, vytvořit síť z luminiscenčních vláken (obr.25), které by měly dostatečnou svítivost a pevnost [4].



Obr. 25: Návrh sítě z luminiscenčních vláken

To se ovšem ukázalo jako nevhodné, protože u tohoto typu sítě by bylo velmi náročné zabezpečit, aby nedocházelo ke chvění. Nakonec od italských kolegů zazněl návrh vytvořit síť z reflexních pásků, které by se vhodným způsobem osvětlily. Proto se tato

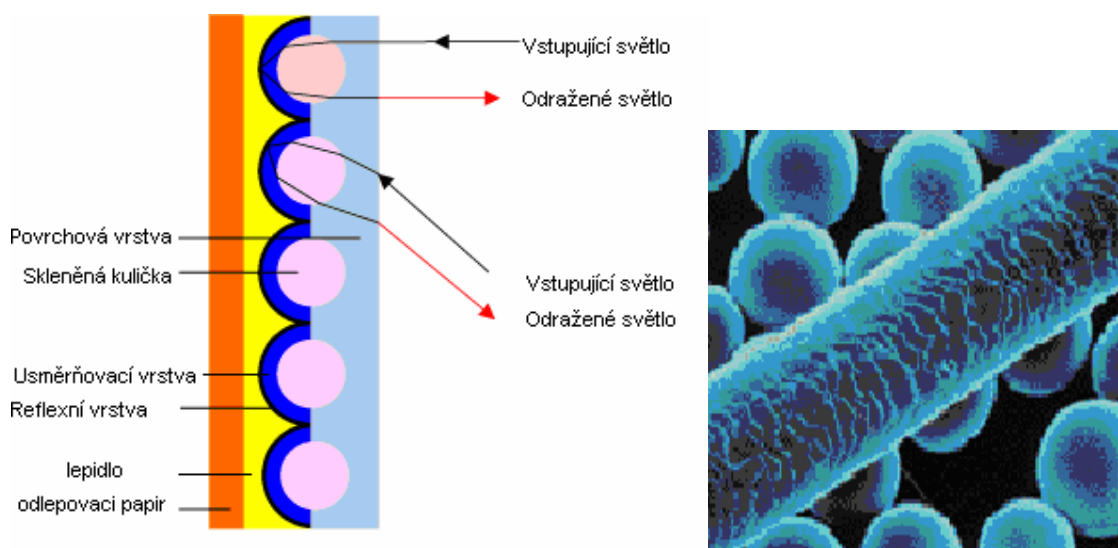
diplomová práce současně zabývá návrhem a testováním reflexních pásků (šířka, mezery mezi jednotlivými proužky, materiál apod.) a taky návrhem jejich nejvhodnějšího osvětlení.

7.1.2 Princip odrazu reflexivních pásků

Reflexní pásy se skládají z materiálu, který byl speciálně vyvinut pro noční osvětlení silnic a dálnic. Reflexního materiálu se využívá tam, kde je potřeba zviditelnit nějakou část pomocí odrazu světla (dopravní značky, ochranné pracovní vesty na silnicích atd.).

Vratný odraz je zvláštní optický odrazový fenomén, kdy světlo dopadá na plochu v nahodilém směru. Světelný paprsek odrážející se zpět speciálním způsobem zvyšuje viditelnost ze směru světelného zdroje (obr. 26). Světlo odrážející se z odrazného materiálu vyzařuje tak, že se zdá jako by páska zářila.

Struktura reflexního materiálu se skládá z tisíce malých skleněných kuliček (jen 40 μm - 90 μm v průměru), rovnoměrně uspořádaných v pryskyřici, takže dohromady dávají plochu tenkou 100 μm - 300 μm . Každá kulička je kompletní kulovité tělo, které pracuje jako optická spojka. Dopadající světlo se láme na povrchu materiálu a je soustředěné do jednoho bodu. Poté se odráží na zrcadlicí vrstvě ve spodní části kulovitého těla a vrací se směrem ke světelnému zdroji. Následkem toho, odrážející se světelný paprsek způsobuje, že reflexní proužek vypadá jako samostatný zdroj světla [12].



Obr. 26: Vlevo princip činnosti reflexního pásku a vpravo zvětšená fotografie skleněných kuliček v porovnání s lidským vlasem.

7.2 Testování osvětlení sítě

7.2.1 Výběr světelného zdroje

S ohledem na to, že čtvercová síť bude právě reflexní, je zapotřebí navrhnout takové osvětlení, aby byl obraz sítě ve fotoaparátu dostatečně ostrý. Osvětlení ale nesmí být příliš velké, protože by byl vyfocený obraz rozmazaný (přeexponovaný). Je třeba najít tedy takové rozmezí intenzity světla, kdy daná síť odráží světlo a tím vytváří přesný obraz, ale kdy ještě nedochází k přesvícení a tím ke znehodnocení přesnosti obrazu.

Na simulování osvětlení reflexní sítě jsem již využil postavené testovací konstrukce, kde je experiment uspořádán tak, že přesně koresponduje s rozměry v RICH-1

Při expoziční době 1s byly testovány 3 druhy osvětlení:

- halogenovou žárovku – OSRAM – 12V, 10W
- červená LED dioda LUXEON-L-LXHL-LW6C, 5W, 7A, 5500K, HEXAGON – 20x7,5mm
- bílá LED dioda LUXEON-L-LXHL-LW6C, 5W, 7A, 5500K, HEXAGON – 20x7,5mm

Dále bylo třeba vyřešit otázku, jak vyhodnotit parametry jednotlivých zdrojů osvětlení reflexní sítě. V první řadě samozřejmě vizuálním pohledem tzn. - umět daný obrázek dostatečně a ostře přiblížit na počítači tak, aby byly od sebe rozeznatelné jednotlivé pixely. To ale není dostatečný ukazatel. Proto jsem využil vzorec, který určuje nejlepší parametry uvedených světelných zdrojů.

$$\theta_{img} = (\overline{I_A} - \overline{I_B}) + \frac{\rho}{\sigma_A - \sigma_B} \quad (12)$$

Kde: A – je část obrázku s vysokou intenzitou osvětlení

B – je část obrázku s nízkou intenzitou osvětlení

$\overline{I_A}$, $\overline{I_B}$ - je průměr intenzit osvětlení z různých úhlů pro světlou a

tmavou část. V našem měření nebylo třeba měřit osvětlení z více úhlů, protože bylo jasné, že reflexní pásy budou odrážet, ze všech úhlů podobně.

σ_A , σ_B - je standardní směrodatná odchylka intenzity pixelů v A či B

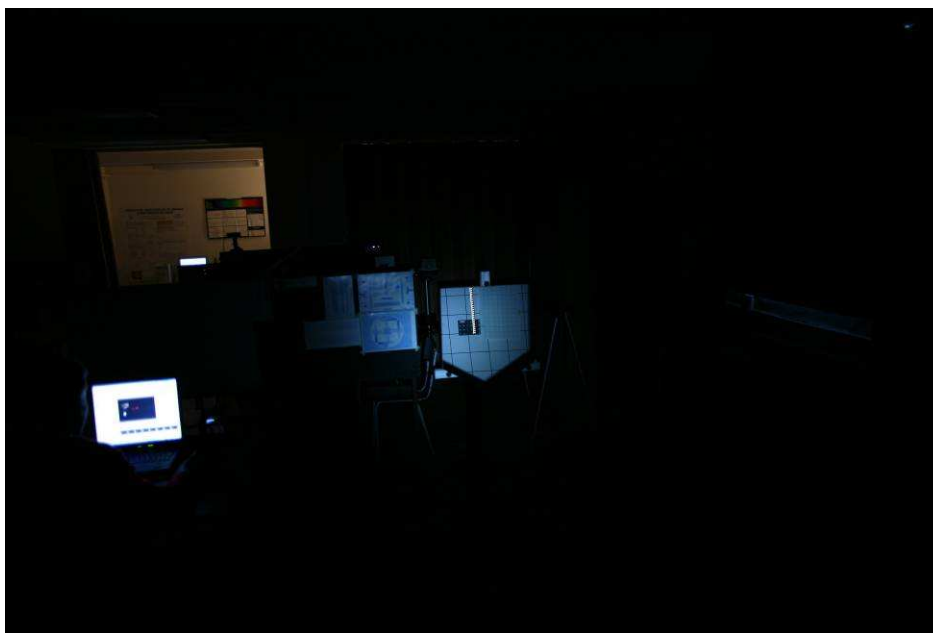
ρ - Je to faktor, udávající relativní důležitost druhého členu v rovnici oproti členu prvnímu. V našem případě byly intenzity světla, odraženého od reflexních pásků a od tmavého okolí, velmi rozdílná, proto druhý člen neměl velký význam.

Tedy čím je větší číslo θ_{img} tím je kvalita osvětlení lepší [12].

Pro počítání tohoto kvantifikátoru osvětlení θ_{img} jsem vytvořil v softwaru MATLAB program, který zjistí všechny údaje z daného výřezu obrázku a dokáže určit θ_{img} viz. příloha č.1.

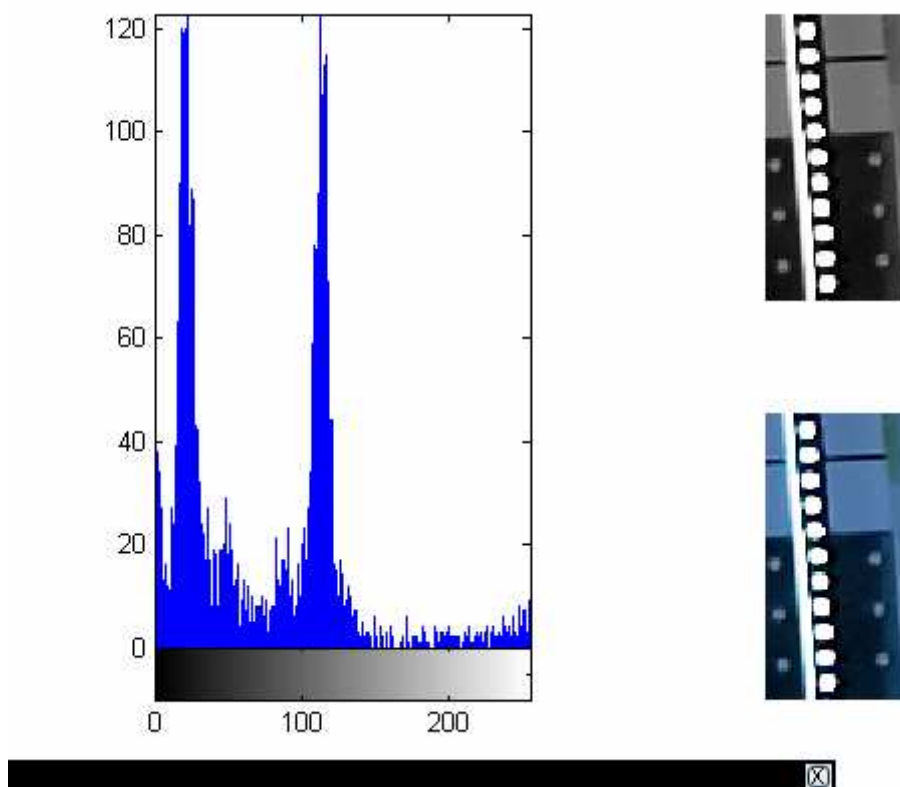
Kvalitu osvětlení sítě obrázku lze také určit z histogramu konkrétního obrázku, či jeho výřezu. Proto jsem do stejného programu v MATLABu také zařadil vytvoření histogramu pro daný konkrétní výřez obrázku.

Testování bylo prováděno následujícím způsobem: Nejdřív byly připraveny rozměry náhodně zvoleného zrcadla a za tmy postupně focena síť při osvětlení všemi třemi světelnými zdroji a následně zpracováno v MATLABu.



Obr. 27: Nezpracovaný obrázek při osvětlení bílou LED diodou.

Na Obrázku vidíme osvětlení sítě bílou LED diodou, kde je testovací proužek, který narozdíl od papírového pozadí se čtvercovou sítí svítí nejvýrazněji. Testovací reflexní proužek byl záměrně umístěn na bílé a kovové pozadí, aby se zjistilo, jak se obraz chová na kovu. Předpokládalo se totiž, že reflexní síť bude v RICH-1 umístěna na kovovém pozadí. Což se také uskutečnilo.

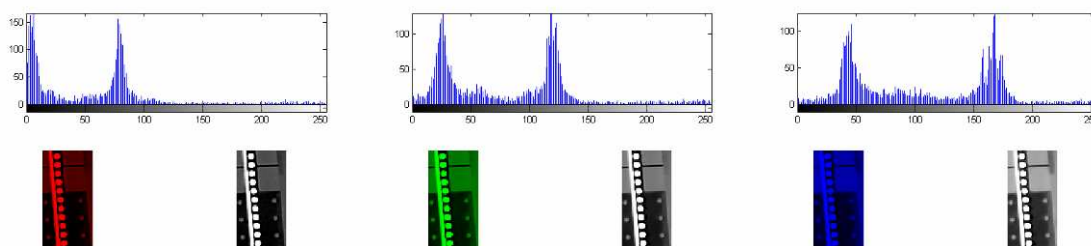


Obr. 28: Osvětlení reflexní sítě bílou LED diodou a jeho histogram

V principu program pro vyhodnocování obrázku funguje následovně: Nejprve se obrázek načte a převede do jednobarevného odstínu. Tím můžu určit intenzity nejtmařejší a nejsvětější části. Program projede celou matici obrázku a určí práh a následně rozdíl intenzit barev. Dále už pokračuje víceméně podle vzorce pro θ_{img} .

Na obr. 28 je vidět osvětlení bílou LED diodou. Obrázek je převedený do šedých odstínů a vlevo je zobrazený jeho histogram. V histogramu je názorně vidět jak jsou jednotlivé odstíny barev od sebe lehce rozeznatelné což právě potřebujeme.

Dále jsem pro ověření provedl převedení obrázku na složky RGB (červená, zelená, modrá) Ukázalo se, že výsledky pro bílou LED jsou velice uspokojující.



Obr. 29: Převedení obrázku na složek RGB.

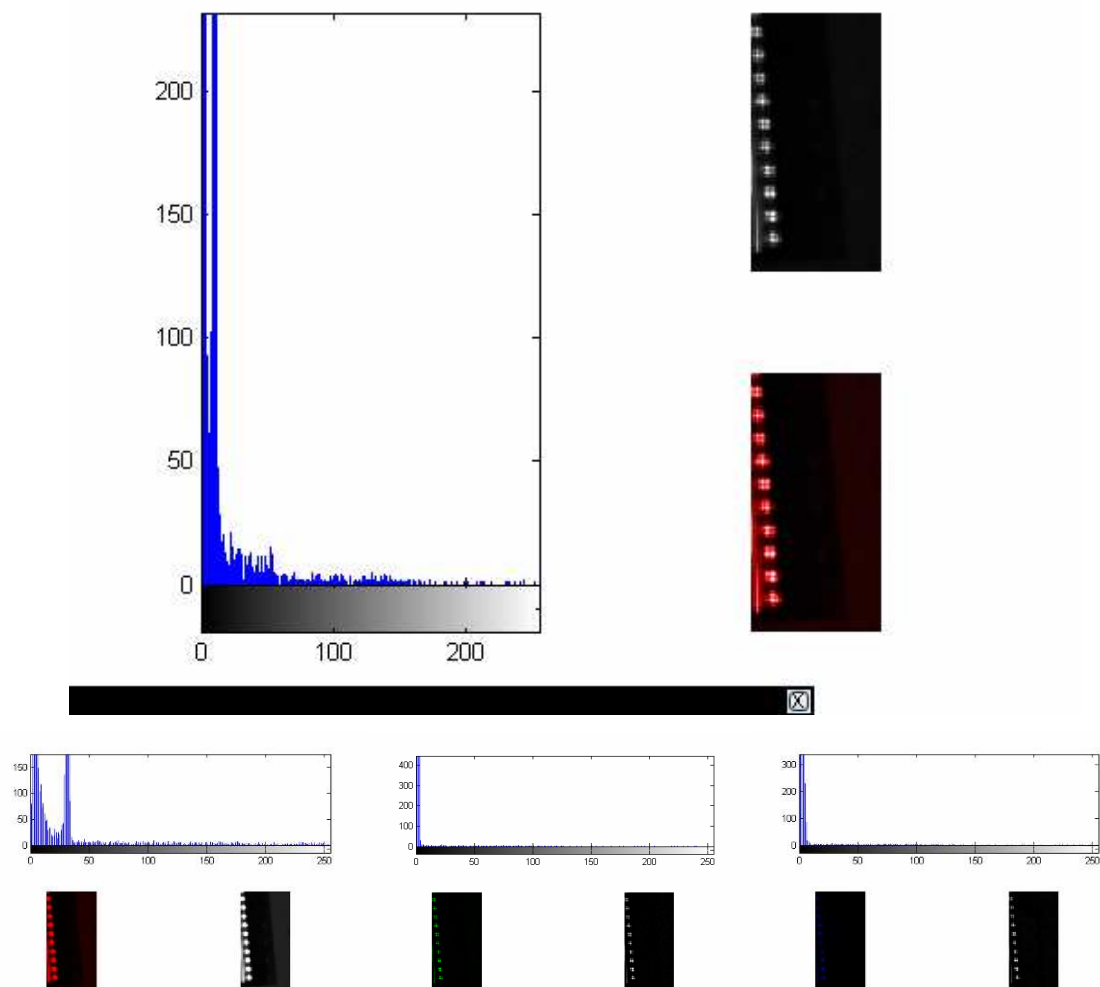
Výsledky pro bílou LED diodu:

$$\underline{\underline{\theta_{img} = 168.9540}}$$

Kde ρ jsem volil 10, $I_A = 229.9637$, $I_B = 61.0151$, $\sigma_A = 42.3940$, $\sigma_B = 43.7243$,

Stejné výpočty jsem provedl i pro osvětlení červenou LED diodou a halogenovou žárovkou.

Pro červenou LED



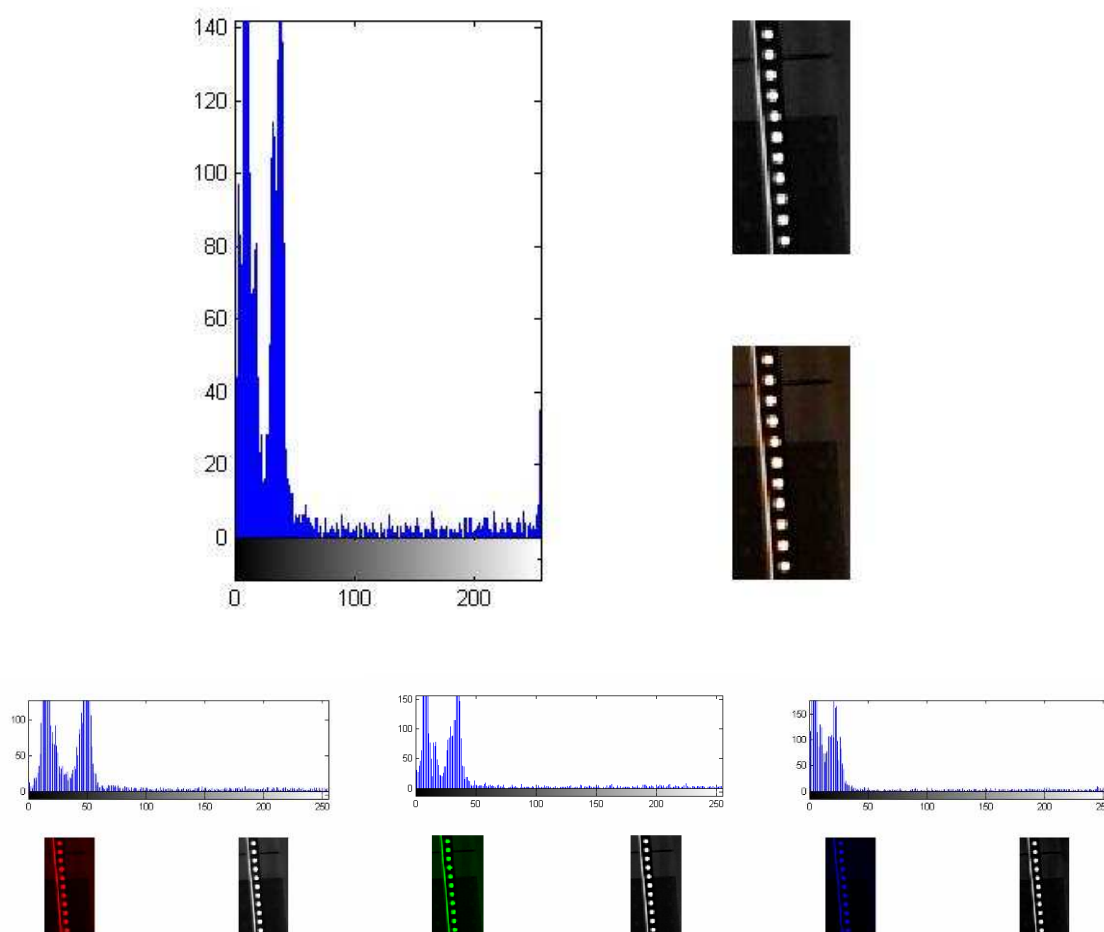
Obr. 30: Osvětlení červenou LED diodou a rozložení na RGB.

Výsledky pro červenou LED diodu:

$$\underline{\underline{\theta_{img} = 152.4818}}$$

$I_A = 163.0941$, $I_B = 10.6287$, $\sigma_A = 36.5914$, $\sigma_B = 16.6747$,

Pro Halogenovou žárovku:



Obr. 31: Osvětlení Halogenovou žárovkou a rozložení do RGB složek.

Výsledky pro halogenovou žárovku:

$$\underline{\underline{\theta_{img} = 181.8979}}$$

: $I_A = 204.9377$, $I_B = 23.0536$, $\sigma_A = 40.1499$, $\sigma_B = 18.1210$,

Porovnání výsledků: $\underline{\underline{\theta_{img} = 168.9540}}$ - **bílá LED**

$$\underline{\underline{\theta_{img} = 152.4818}}$$
 - červená LED

$$\underline{\underline{\theta_{img} = 181.8979}}$$
 - **Halogenová žárovka**

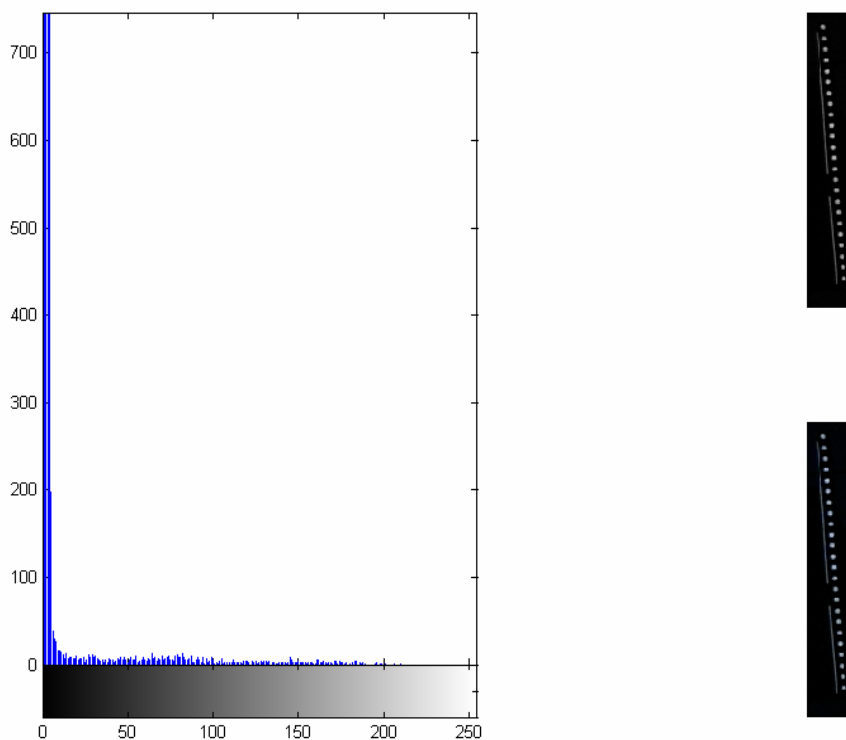
Nejlepší číslo θ_{img} vyšlo u halogenové žárovky. Přesto po vyhodnocení všech jsem zjistil, že nejlepší osvětlení je u bílé LED. Je to dáno tím, že všechny fotografie jsou pořízeny se stejným výkonem a se stejnou expoziční dobou. Pro bílou LED je obraz v tomto výkonu a expoziční době už přexponovaný tzn. že obraz je mírně rozmázlý (příliš osvětlený) a to nám zmenšuje číslo θ_{img} . U bílé LED diody je proto možné snížit výkon

zdroje a zkrátit expoziční dobu aby byl obraz stejně ostrý jako u halogenové žárovky s původním zdrojem a expoziční dobou.

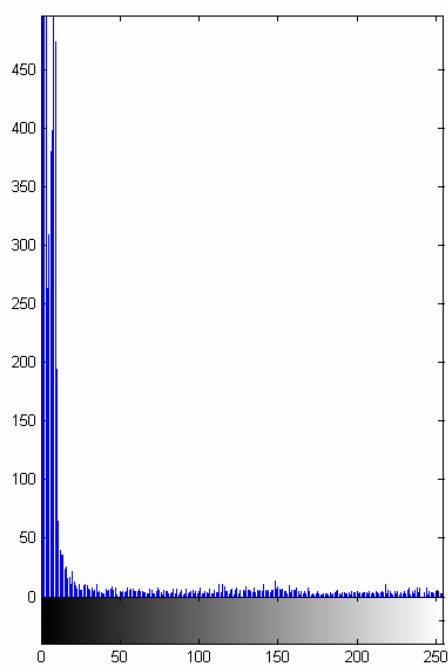
Závěrem pro osvětlení sítě tedy plyne, že nejlepším osvětlením je osvětlení bílou LED diodou, protože u bílé LED diody stačí jen málo výkonu a krátká expoziční doba, aby byl reflexivní materiál dobře osvětlený.

7.2.2 Hledání nejlepší expoziční doby

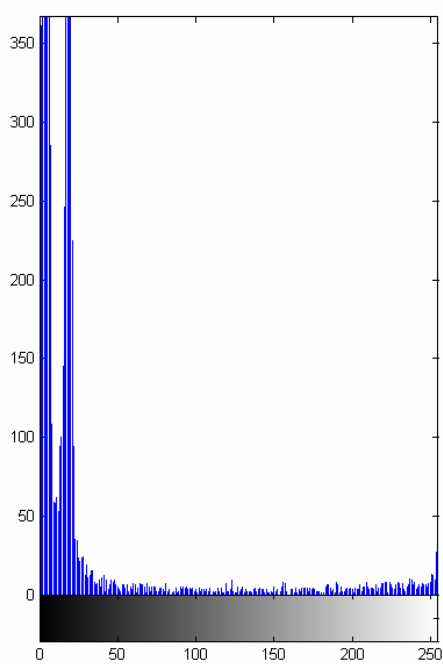
Při hledání nejlepší expoziční doby jsem použil jedné polohy zrcadla při osvětlení bílou LED diodou, kterou jsme vybrali jako nejvhodnější ze všech tří druhů. Osvětlený obraz jsem vyfotil při různých expozičních dobách a každý obrázek vyhodnotil programem pro výpočet θ_{img} v MATLABu.



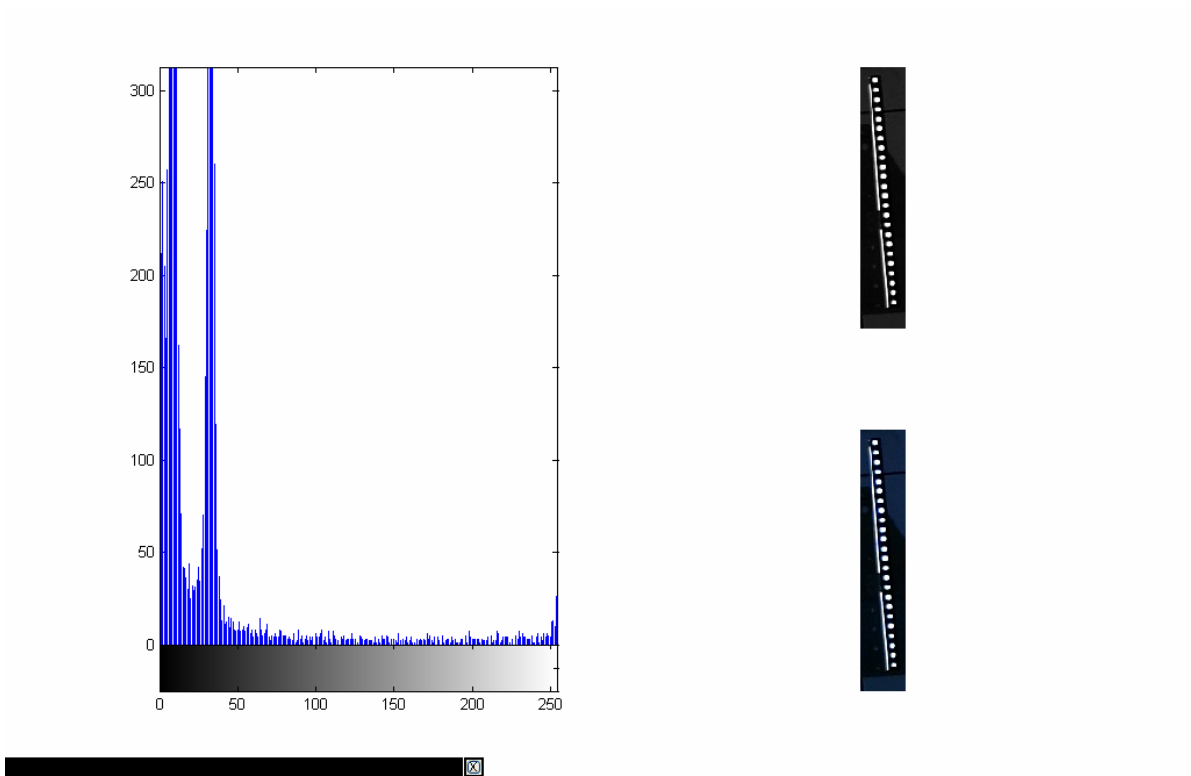
Obr.32 Expoziční doba $T=0,16s \Rightarrow \theta_{img} = \underline{\underline{148}}$



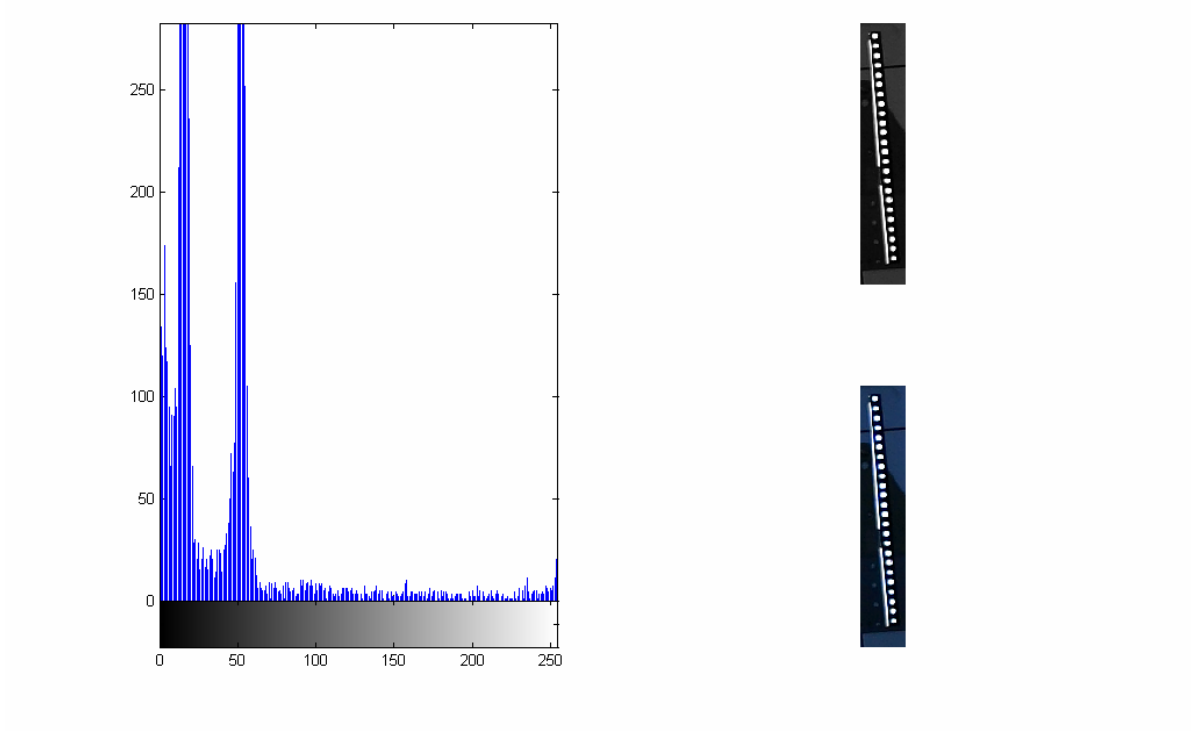
Obr. 31: Expoziční doba $T=0,3s \Rightarrow \theta_{img}=\underline{\underline{178}}$



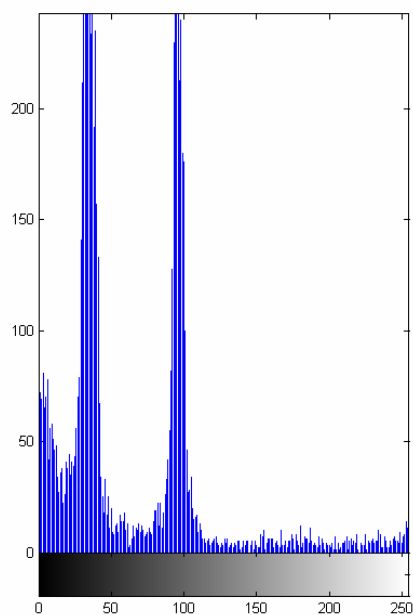
Obr. 33: Expoziční doba $T=0,6s \Rightarrow \theta_{img}=209$



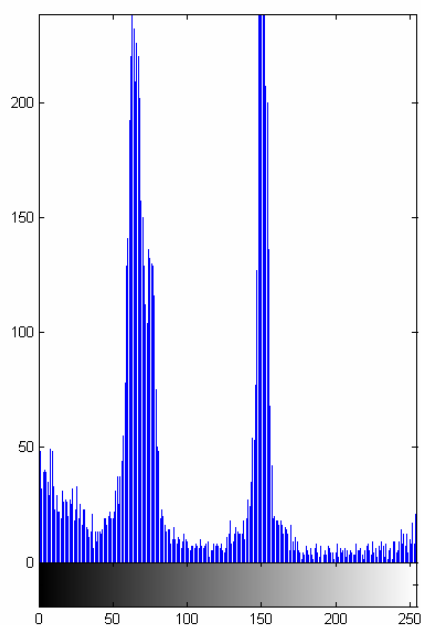
Obr. 34: Expoziční doba $T=1s \Rightarrow \theta_{img}=213$



Obr. 35: Expoziční doba $T=1,6 s \Rightarrow \theta_{img}=202$



Obr. 36: Expoziční doba $T=3,2s \Rightarrow \theta_{img}=179$



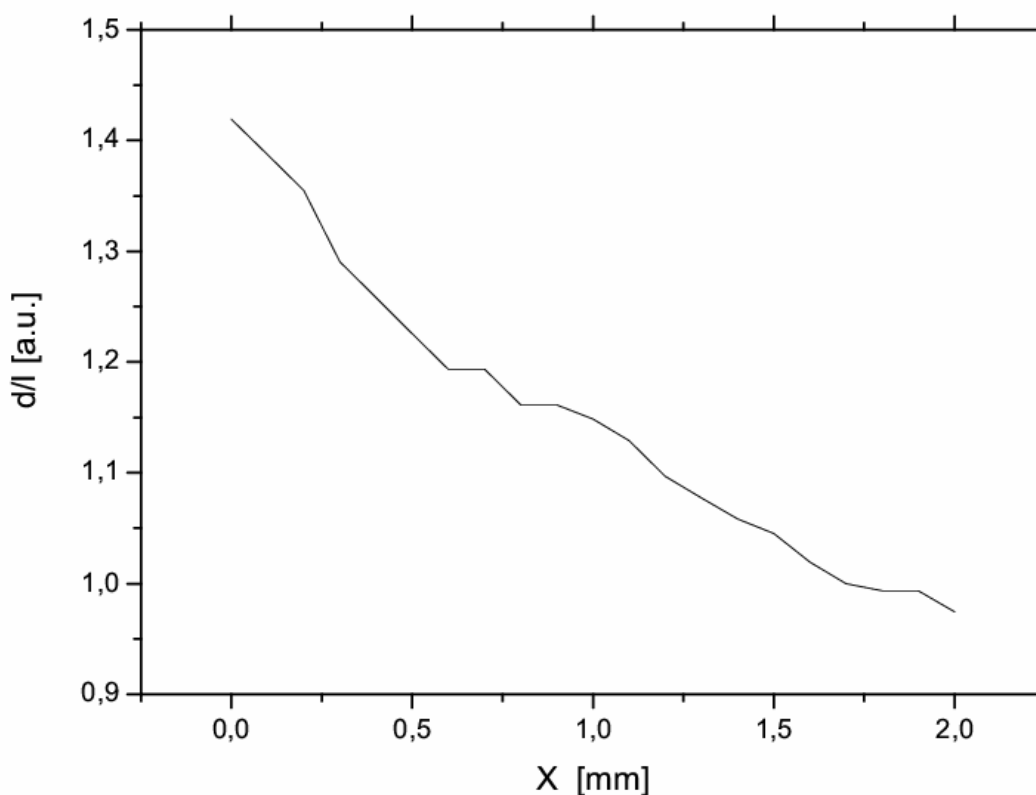
Obr. 37: Expoziční doba $T=6s \Rightarrow \theta_{img}=110$

Z obrázků vidíme, že nejlepších výsledků dosahuje fotka s expoziční dobou 1s (obr. 34). Z histogramů je také vidět patrný rozdíl mezi reflexní a tmavou plochou. Taktéž je v histogramu dobře rozeznatelné kovové a bílé pozadí, což nám posloužilo k vybrání pozadí pro síť v RICH-1.

7.2.3 Velikost kuželu světla

Poslední rozhodnutí, před namontováním osvětlení reflexní sítě, bylo zapotřebí učinit ohledně velikosti kužele světla, tak aby zaujímal celou plochu jedné čtvrtiny mozaiky zrcadel.

Vybraná bílá LED dioda sama vrhá na potřebnou vzdálenost od zrcadel až moc velký kužel, tedy je třeba světlo nějak usměrnit, aby největší intenzita paprsků světla dopadala na naši potřebnou čtvrtinu zrcadel. Přitom jsem využil pomoc Doc. Šulce, který má v tomto směru bohaté zkušenosti. Navrhl a zajistil čočku, která splňovala potřebné parametry. Bylo už jen třeba čočku otestovat a určit jak daleko má být od LED diody vzdálena, aby kužel světla byl ideální. To jsem uskutečnil jednoduchým testem v laboratoři, kdy jsem přibližováním čočky k LED diodě určil, podle velikosti světelného kužele, potřebnou vzdálenost od čočky.



Obr. 38: Závislost d/l na X

Kde: l – vzdálenost osvětlovacího světelného zdroje od zrcadel

d – průměr kuželu světla

X – vzdálenost čočky od nejvyšší části LED diody

Vzhledem k tomu, že rovinná plocha zrcadel je 2650 x 2153 mm a vzdálenost fotoaparátu od zrcadel je 2780 mm můžeme podle grafu říct, že ideální vzdálenost čočky od nejvyšší části LED diody je přibližně 1 mm. Toto zjištění Doc. Šulc potvrdil a tudíž bylo možné provést montáž osvětlovacího systému do RICH-1.



Obr. 39: Osvětlovací systém namontovaný do RICH-1

Na obrázku vidíme konečné řešení osvětlovacího systému (LED dioda s čočkou), tak jak bylo navrženo a namontováno do RICH-1. Čočky jsou připevněny k držáku pro fotoaparáty. Ke každému fotoaparátu byly umístěny dva osvětlovací systémy. Je to s důvodu poruchy jednoho z nich.

7.3 Určení šířky reflexního pásku a vzdálenosti mezi nimi

Při úvahách o velikosti šířky reflexního pásku vycházíme z obrázků pořízených při testech na osvětlení sítě (obr.32 – obr. 37). Z obrázků jde vidět, že šířka bodů testované sítě je skoro vyhovující, protože všechny body jsou dostatečně rozeznatelné a dostatečně osvětleny, proto byla zvolena, po konzultaci s Doc. Šulcem, šířku reflexní sítě 1 cm.

Rozměry čtvercové reflexní sítě jsme určili z jednoduché úvahy, že zrcadlo je veliké 450 mm x 520 mm – (viz obr. 9). Proto jsme zvolili mezery mezi reflexními proužky 100 mm. To znamená, že na každém zrcadle se zobrazí 4 – 5 reflexních proužků v horizontálním i vertikálním směru

8 Kalibrace vychýlení zrcadel

V této části diplomové práce je navrženo a popsáno, jak měřit a vyhodnocovat vzájemné odchylky zrcadel z vyfoceného obrazu. Základní otázka zní: „Jak z vyfoceného obrazu určím o kolik miliradiánů je zrcadlo vychýlené?“. Tuto otázku zodpoví měření, které získáme přesnými simulacemi poloh zrcadel, obdobně jako v detektoru RICH-1, z čehož získáme údaje pro jednotlivá vychýlení zrcadla, dá se říct kalibrační hodnoty.

Podstata tohoto měření spočívá ve vychýlení zrcadla o známou, předem definovanou hodnotu s fotografickým záznamem obrazu před a po vychýlení. Tím získáme měřítko, tzn. jaké vychýlení zrcadla ve skutečnosti odpovídá posunutí polohy obrazu zrcadla na vyfocené obrázku.

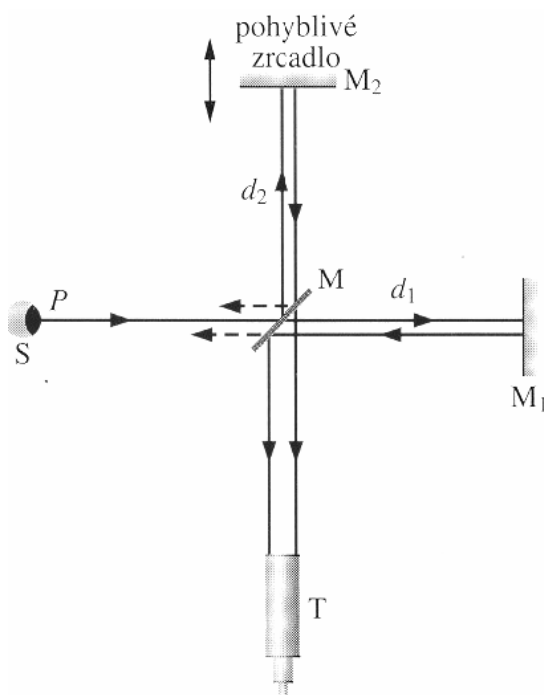
Avšak každé zrcadlo má jinou polohu vůči fotoaparátu, tedy bylo provedeno měření polohy každého zrcadla zvlášť. Dále bylo nutné zvážit fakt, že chybné vychýlení zrcadel je možné v jakémkoliv směru, proto bylo provedeno měření při horizontálních i vertikálních náklonech.

Tato část diplomové práce se tedy zabývá nastavováním poloh zrcadel v laboratorním prostředí, tak abychom dosáhli přesných nastavení tak jako je v RICH-1 a simulováním odchylek zrcadel a jejich focení. Na základě těchto simulací už bude možné určit kalibrační hodnoty posunutí zrcadel a vytvoření softwaru pro jejich korekce, čímž se zabývá disertační práce Ing. Lukáše Steigera.

8.1 Určení přesného vychýlení zrcadla

Vychýlení zrcadla je možné nejpřesněji měřit teodolitem v autokolimačním režimu (interferometrem). Interferometr je zařízení, kterým můžeme měřit s vysokou přesností délky nebo délkové změny pomocí interferenčních proužků. V této diplomové práci byl vybrán princip Michelsonova interferometru, se kterým dokážeme s velkou přesností naměřit odchylky zrcadel.

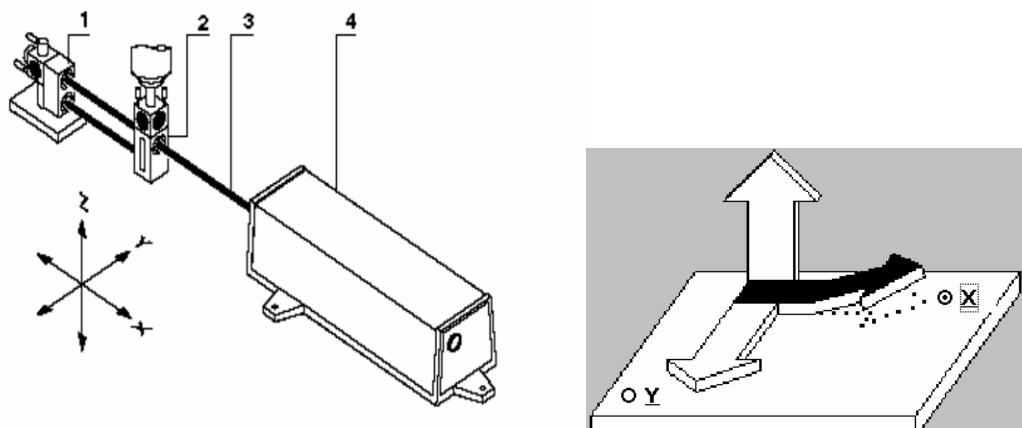
Princip Michelsonova interferometru je na obr. 40.



Obr. 40: *Princip Michelsonova interferometru*

Uvažujme-li světlo, které vychází z bodu P na prostorovém (nebodovém) zdroji S, které dopadá na dělič svazku M, tj. zrcadlo, které propouští polovinu dopadajícího světla a odráží zbytek (pro jednoduchost uvažujeme na obrázku jeho zanedbatelnou tloušťku). Světlo se zde rozdělí na dvě vlny. Jedna postupuje po průchodu děličem k zrcadlu M_1 , druhá vlna se odráží směrem k zrcadlu M_2 . Vlny se na obou zrcadlech odrazí a postupují zpět k děliči, který je nasměruje do dalekohledu T. Pozorovatel vidí strukturu zakřivených nebo přímých interferenčních proužků. [12]

V této diplomové práci byl použit pro měření interferometr od firmy Agilent Hewlett Packard (obr.41) s Michelsonovým principem (dále jen interferometr), který se navíc vyznačuje jednoduchou manipulovatelností v nastavování interferometru přesně podle potřeb měření. Další velkou výhodou tohoto interferometru je možnost připojení k počítači přes rozhraní USB, čímž je možné sledovat hodnoty rovnou na počítači s možností jejich ukládání.



Obr. 41: Schéma soustavy interferometru pro měření vychýlení v ose X

- (1) – Odrazný hranol (Agilent 10771A)
- (2) – Interferometr (Agilent 10770A)
- (3) – laserový paprsek
- (4) – zdroj a snímač laseru (Agilent 5519A/B)

Přesnost měření tímto interferometrem je 0,005 mrad. Měření vychýlení zrcadla interferometrem bylo provedeno takto: odrazný hranol (1) byl umístěn na pohyblivou hlavu stojanu zrcadla a interferometr byl uchycen na samostatném nepohyblivém stojanu. Laserový zdroj byl umístěn na vlastním stojanu, který umožňuje posuny a vychýlení podle potřeby měření. Aby při vychylování zrcadla nedocházelo k dopadnutí laserového paprsku mimo odrazný hranol, byl vyroben držák, který umožňuje jeho naklonění, což je vyfoceno na obr. 42.

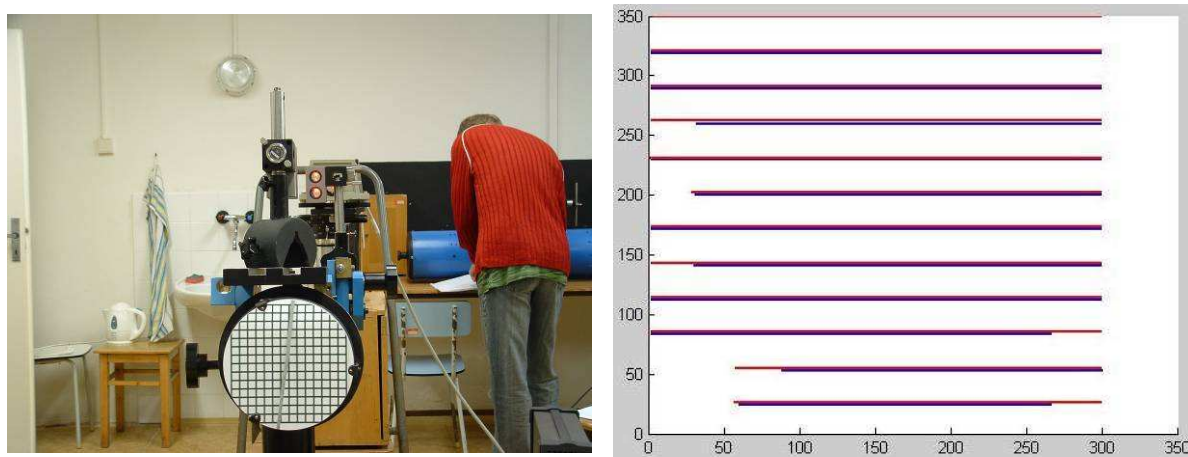


Obr. 42: Uchycení odrazného hranolu na stojanu zrcadla

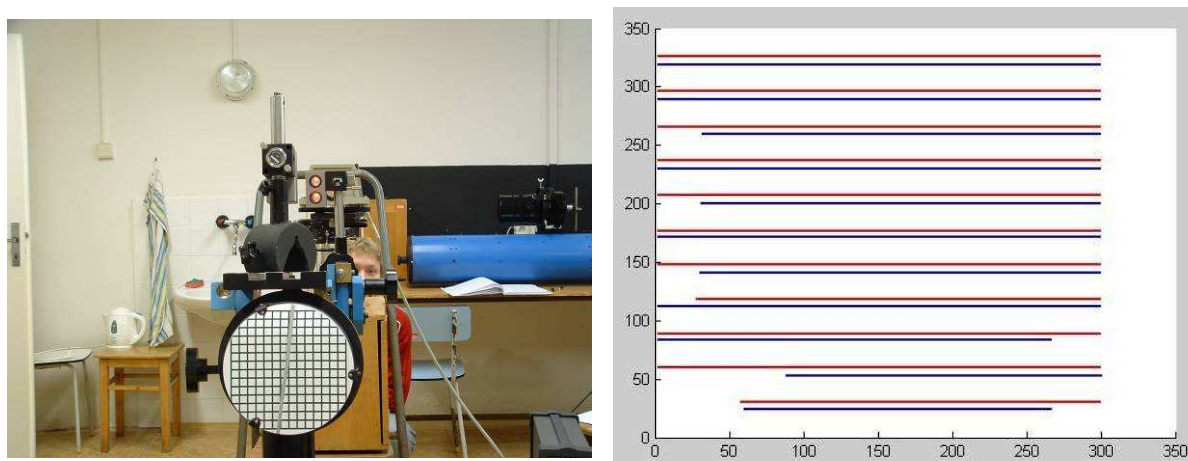
8.2 Testování měřící metody

8.2.1 Testování s kruhovým zrcadlem

Před montáží konstrukce na posuv fotoaparátu se otestovala použitelnost metody zjišťování posunu obrazu reflexní sítě v závislosti na měření interferometrem za použití kruhového zrcadla a fotoaparátu dostupného ve fyzikální laboratoři. Interferometr byl nastavený pro měření vertikálního vychýlení. Zrcadlo bylo připevněno ke stojanu (viz obr. 42), který byl později využit i jako stojan pro pětiúhelníkové zrcadlo.



Obr. 43: Vlevo je kruhové zrcadlo s interferometrem při vychýlení o $0,13$ mrad. Vpravo je znázornění odchylky vychýleného zrcadla (červený proužek) od původní polohy (modrý proužek).



Obr. 44: Vychýlení zrcadla o $0,993$ rad.

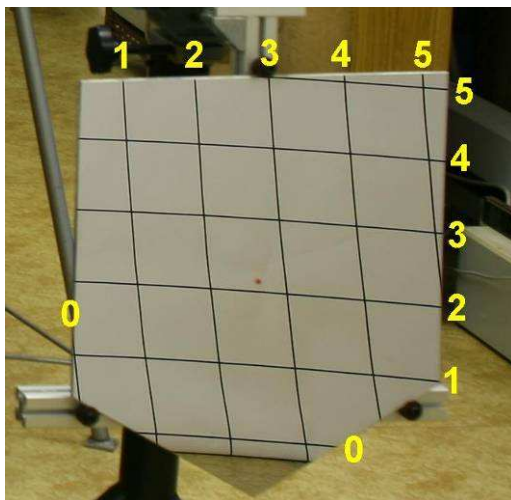
Po vyhodnocení obr. 43 a obr. 44 je zřejmé, že již na obr.42 je z obrazu možné rozeznat vychýlení zrcadla.

Z toho provedeného testovacího měření plyne, že touto metodou je možné s dostatečnou přesností určit kalibrační hodnoty všech třiceti zrcadel.

8.2.2 Testování se zrcadlem z RICH-1

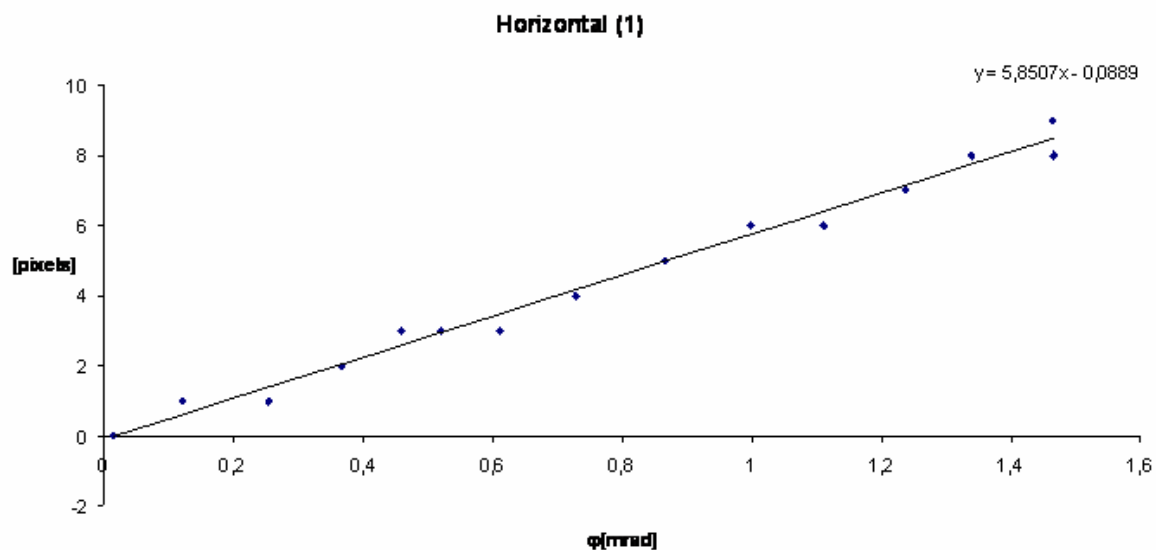
Při prvním testování měřicí metody na konkrétním zrcadle a s fotoaparátem se stejnými parametry jako v RICH-1, ještě nebyla k dispozici konkrétní navrhnutá reflexní síť. Proto byla vytvořena náhrada vytisknutím sítě na formát papíru A0 tak, aby mezery mezi jednotlivými pruhy čtvercové sítě byly přesně 10cm. Síť sice nebyla reflexní, ale dobře posloužila pro toto první zkušební měření.

Byla zvolena poloha zrcadla č.8 (viz obr. 9) z horní čtvrtiny zrcadel. Podle momentálně dostupných informací o vzdálenostech fotoaparátu od zrcadla byla přibližně nastavena poloha zrcadla vůči fotoaparátu a síť tak, aby vzdálenosti odpovídaly právě zrcadlu č.8. Vyfocený obraz sítě je vidět na obr. 45.

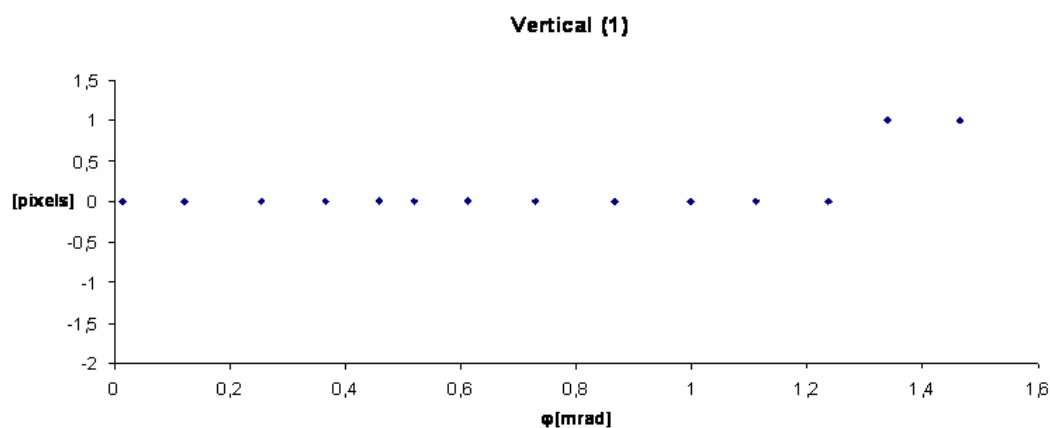


Obr. 45: *Obraz sítě na zrcadle č.8 a očíslování jednotlivých horizontálních a vertikálních linek*

Ing. Lukáš Šteiger potom vyhodnotil horizontální a vertikální vychýlení pro každý pruh

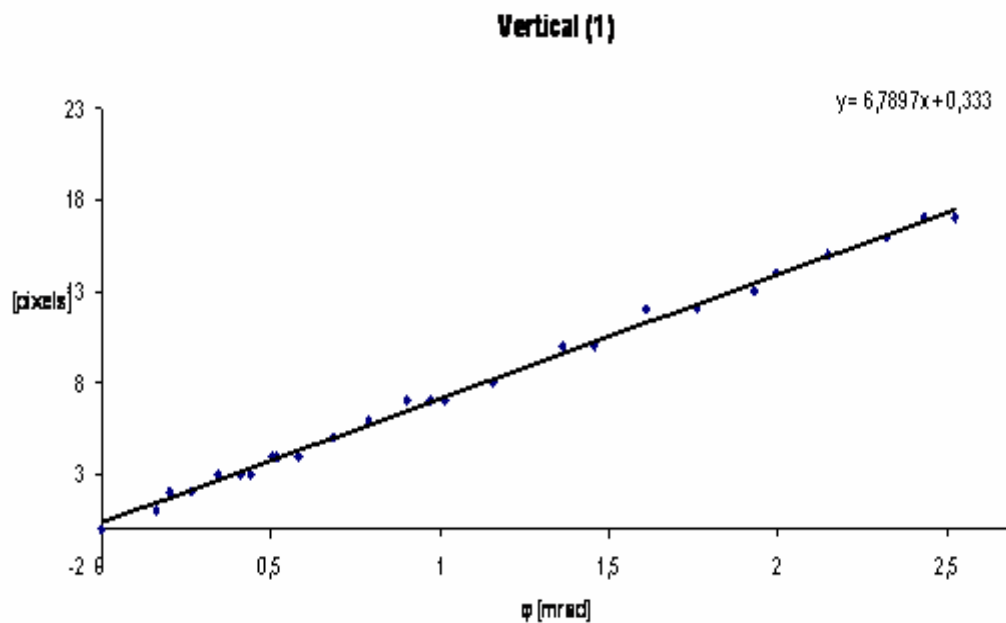


Obr. 46: Ukázka závislosti posunu obrazu v pixelech na vertikálním vychýlení zrcadla φ v miliradiánech pro první horizontální řadu.

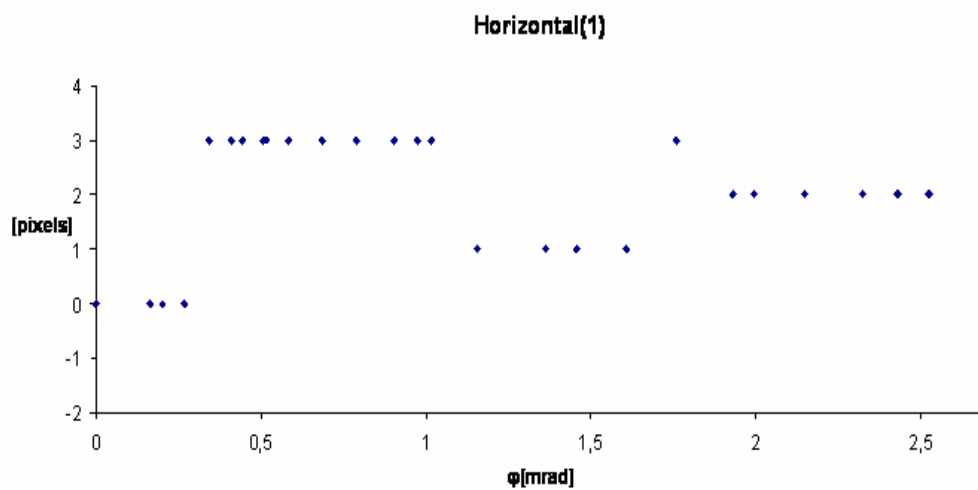


Obr. 47: Vychýlení vertikální čáry při horizontálním vychýlení

Z jednotlivých grafů vidíme, že při vertikálním náklonu zrcadla je posun horizontální čáry dostatečně rozeznatelný a pro porovnání zda se nám nějak pohnula vertikální čára, zjišťujeme, že její posun je minimální viz. ukázka na obr. 46, 47. Tento minimální posun byl pravděpodobně způsoben otřesy podlahy při chůzi. Stejně i při horizontálním náklonu zrcadla se vertikální čára významně nezmění viz. ukázka na obr. 48, 50 a příloha 2.



Obr. 48:. Ukázka závislosti posunu obrazu v pixelech na horizontálním vychýlení zrcadla φ v miliradiánech pro první vertikální řadu.



Obr. 49: Vychýlení horizontální čáry při vertikálním vychýlení

Tabulka 1. Odchyly linek při vertikálním a horizontálním posunutí zrcadel.

a)

Vertikální posun		
<i>Linka</i>	<i>S_y</i>	<i>S_x</i>
1	6,78	0,13
2	7,00	0,25
3	7,40	0,79
4	7,00	0,82

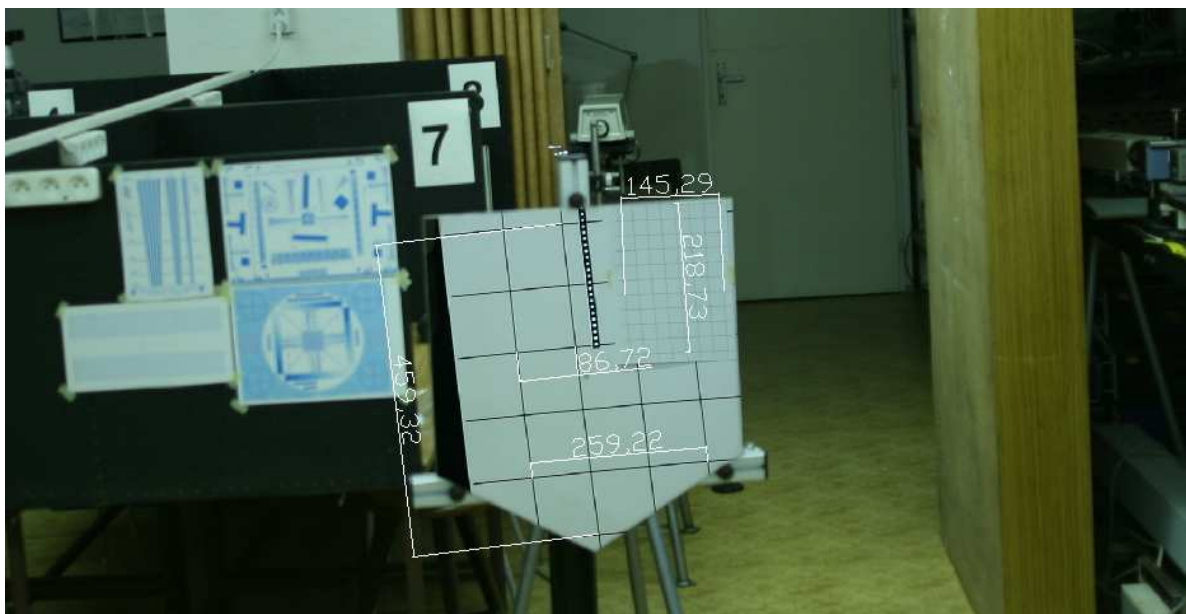
b)

Horizontální posun		
<i>linka</i>	<i>S_x</i>	<i>S_y</i>
1	5,85	0,57
2	6,02	0,40
3	5,65	0,71
4	5,94	2,24

Z tabulky 1a,b je vidět změnu obrazu všech čtyř kompletních linek (viz. obr. 45) na jednom zrcadle při vertikálních i horizontálních výchylkách. Ze všech těchto hodnot můžeme říct, že zrcadlo je při náklonech stabilní. Tzn., že při horizontálním vychylování se vertikální hodnota prakticky nemění (pro danou polohu zrcadla) a naopak. Grafy závislosti výchylek čar 2, 3, 4 pro horizontální i vertikální posun jsou uvedeny v příloze 2.

8.2.3 Počet pixelů na mm

Z provedeného prvního otestování je již možné přibližně určit velmi důležitý údaj při dané konfiguraci: kolik pixelů odpovídá jednomu milimetru v rovině reflexní sítě. Zjistíme to z vyfoceného obrazu kde známe vzdálenosti mezi proužky a v programu Autocad lze odměřit kolik pixelů odpovídá dané vzdálenosti odpovídá pixelů (obr.50). Z obrázku je vidět, že např. vzdálenosti 500 mm odpovídá 459 pixelů. Zjištěný podíl tedy znamená, že 1pixel~1.1 mm. Pro přesnost jsem měření provedl vícekrát v jiné části obrazu a vychází přibližně stejně.



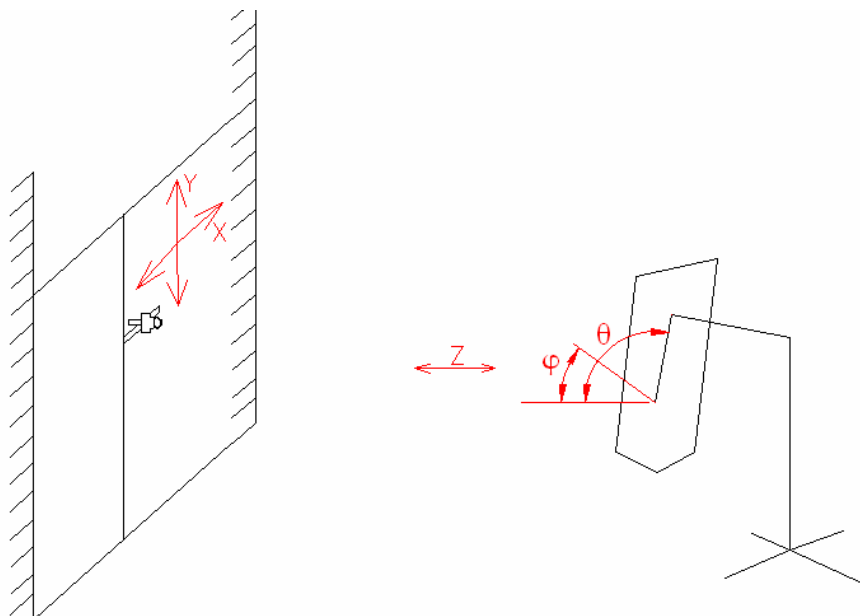
Obr. 50: Určení počtu pixelů při známé vzdálenosti v AutoCadu

9 Závěrečné měření všech jednotlivých zrcadel

9.1 Získání souřadnic zrcadel

Největším problémem při finálním měření každého zrcadla nebylo samotné měření, ale sestavení a nastavení měřicí aparatury tak, aby odpovídala parametrům potřebným pro nastavení poloh všech zrcadel jako jsou v RICH-1. Důležité bylo zjistit souřadnice fotoaparátu vůči zrcadlu a následně vymyslet jak nejlépe zajistit co nejpřesnější nastavování fotoaparátu a zrcadla do jednotlivých poloh

Pro kompletní nastavování zrcadel bylo nezbytné znát vzdálenosti x , y , z všech zrcadel vůči fotoaparátu a údaje o tom jak jsou jednotlivá zrcadla nakloněná – úhly θ , ϕ . Při zjišťování os x , y , z významně pomohl konzultant Dr. Fulvio Tassarotto, který poskytl 3D schéma celé monitorovací soustavy zrcadel v programu AUTOCAD v měřítku 1:1, ze které už bylo jednoduché údaje odečíst (viz příloha 3). Tyto získané údaje jsou uvedeny v tabulce 2. Údaje o náklonech zrcadel byly získány z dokumentu „THE COMPASS RICH-1 MIRROR WALL GEOMETRY“ [4] tab. 3. Schéma os x , y , z a náklonů zrcadla podle kterých byl v laboratoři nastavován fotoaparát a zrcadlo je naznačen na obr. 51



Obr. 51: Schéma souřadnic fotoaparátu vůči zrcadlu, kde φ je azimutální úhel ve vertikální rovině a θ je tangenciální úhel ve vertikální rovině.

Tabulka 2. Údaje získané z nákresu monitorovací soustavy v programu AUTOCAD

Č. zrcadla	x	y	z
1	1324	1918	2805
2	866	1915	2773
3	412	1909	2710
4	-37	1901	2615
5	-479	1889	2489
6	-910	1875	2332
7	1553	1523	2866
8	1093	1521	2850
9	635	1517	2802
10	181	1510	2722
11	-266	1499	2611
12	-704	1486	2470
13	1323	1125	2895
14	864	1122	2863
15	408	1116	2799
16	-43	1107	2704
17	-485	1096	2577
18	-918	1081	2420
19	1554	727	2907
20	1094	725	2891

21	637	721	2844
22	186	713	2764
23	-259	703	2654
24	-694	690	2513
25	1324,5	327	2900
26	871	324,5	2899,5
27	421	318,5	2867
28	-23,5	310	2804,5
29	-460	298,5	2709,5
30	-887,5	284	2584,5

Tabulka 3. Údaje úhlů zrcadel získané z COMPASS RICH-1 MIRROR WALL GEOMETRY“ [4]

Č. zrcadla	uhel θ	uhel φ
1	102,1806	2,03111
2	102,15468	6,09305
3	102,10297	10,1541
4	102,02574	14,2138
5	101,92339	18,2715
6	101,79643	22,3268
7	98,71481	0
8	98,70191	4,03925
9	98,66329	8,07805
10	98,59913	12,11597
11	98,50977	16,15258
12	98,39566	20,18748
13	95,24679	2,00842
14	95,22116	6,02509
15	95,17002	10,04127
16	95,09363	14,05664
17	94,99238	18,07091
18	94,86676	22,08379
19	91,78519	0
20	91,77244	3,99459
21	91,73424	7,98896
22	91,67079	11,98291
23	91,58239	15,97623

24	91,46947	19,96873
25	88,31298	1,98623
26	88,28763	5,95863
27	88,23705	9,93087
28	88,16149	13,90284
29	88,06131	17,87447
30	87,93699	21,84568

Nyní bylo zapotřebí přepočítat tyto údaje s ohledem na rozměry laboratoře a na parametry soustavy pro posun fotoaparátu a náklon zrcadla. To znamená, že dochází k přičtení rozměrů podle toho, kde se zrcadlo na stojanu nachází a vůči čemu jsou souřadnice nastavovány. Přepočítané číselné hodnoty os jsou označovány velkými písmeny viz. tab. 4. Osa X je nastavovaná od středu zrcadla. Osa Y je nastavovaná od podlahy laboratoře, osa Z je přenesena od zrcadla k protilehlé zdi.

Nákres umístění souřadnic podle kterých je nastavován fotoaparát a zrcadlo je na obr. 51. Fotoaparátem pohybujeme podle os x a y, což pro ten účel zajišťuje postavená posuvná konstrukce viz obr. 23. Posun ve směru osy z zajišťuje pohyb zrcadla. Náklon θ a φ zrcadla je zajišťován nastavovacími šrouby stojanu. Správné odměření náklonu zrcadla byl zajištěno připevněním laseru ke stojanu (obr.52). Laserový paprsek procházel otvorem v zrcadle na protilehlou zeď a vhodnými přepočty byl odměřován náklon zrcadla podle posunu paprsku laseru na zdi. V tabulce 4 jsou již uvedeny přepočítané hodnoty, podle kterých byly odměřovány hodnoty posunu laseru.



Laser pro nastavování vychýlení zrcadla

Obr.52: Ukázka laseru pro nastavování vzdálenosti

9.1.1 Příklady přepočtů pro nastavování souřadnic monitorovací soustavy

- **Příklad pro přepočet osy X:**

$$X = x - 30 - \left[(tg(radians(\varphi)) \cdot 300 + 230 \cdot \frac{(1 - \cos(radians(\varphi)))}{\cos(radians(\varphi))}) \right] = \underline{\underline{1283,22mm}} \quad (13)$$

Kde: - x - je tabulkový údaj získaný z nákresu monitorovací soustavy v AUTOCADu, uvedený v tabulce 2

- 30 - je konstanta odpovídající vzdálenosti od okraje objektivu do jeho středu v mm. Tuto konstantu je třeba odečíst, protože odměřujeme vzdálenost od výchozí polohy zrcadla (viz kapitola 9.3) po okraj objektivu a námi zjištěný údaj z tabulky 2 je od výchozí polohy po střed objektivu

$$- \left[(tg(radians(\varphi)) \cdot 300 + 230 \cdot \frac{(1 - \cos(radians(\varphi)))}{\cos(radians(\varphi))}) \right] -$$

- zabezpečuje vyrušení nežádoucího vychýlení zrcadla kvůli ramenu, na kterém je zrcadlo připevněné

Kde: φ - je úhel vychýlení zrcadla ve směru osy x

Radians – značí přepočet stupňů na radiány

300 – je velikost ramena držáku na zrcadlo

230 – vzdálenost od horního konce ramena držáku do středu zrcadla

- **Příklad pro přepočet osy Y:**

$$Y = y - 30 + 661 - \left[(tg(radians(\theta - 90)) \cdot 300 + 230 \cdot \frac{(1 - \cos(radians(\theta - 90)))}{\cos(radians(\theta - 90))}) \right] = \underline{\underline{2619,05mm}} \quad (14)$$

Kde: - y - je tabulkový údaj získaný z nákresu monitorovací soustavy v AUTOCADu uvedený v tabulce 2

- 30 - je konstanta odpovídající vzdálenosti od okraje objektivu do jeho středu jako v příkladu pro přepočet vzdálenosti osy X.

- 661 - je vzdálenost okraje zrcadla od země, kterou přičítáme, protože ypsilonová souřadnice je odměřována od země.

$$- \left[(tg(radians(\theta - 90))) \cdot 300 + 230 \cdot \frac{(1 - \cos(radians(\theta - 90)))}{\cos(radians(\theta - 90))} \right] - \text{zabezpečuje}$$

taktéž nežádoucí vychýlení zrcadla díky ramenu na kterém je zrcadlo připevněné jako v případě pro přepočítání osy X.

Radians – značí přepočítání stupňů na radiány

Kde: θ - je úhel vychýlení zrcadla ve směru osy y

- **Příklad pro přepočítání osy Z:**

$$Z = z + v_0 = \underline{\underline{2978,00mm}}$$

Kde: z - je tabulkový údaj získaný z nákresu monitorovací soustavy v AUTOCADu, uvedený v tabulce 2

v_0 - je vzdálenost objektivu od zdi, kterou musíme přičíst, protože vzdálenost z odměřujeme od zrcadla ke zdi. Vzdálenost objektivu od zdi se mění nastavováním fotoaparátu

- **Příklad pro přepočítání vychýlení θ_v :**

Vychýlení θ_v je údaj, který odměřujeme posunem pomocného laseru na zdi ve směru osy y. Vypočítáme ho dle vzorce:

$$\theta_v = [(tg(radians(\theta - 90))) \cdot (z + v_o)] = \underline{\underline{674,11mm}}$$

- **Příklad pro přepočítání vychýlení ϕ_v :**

Vychýlení ϕ_v je údaj, který odměřujeme posunem pomocného laseru na zdi ve směru osy x. Vypočítáme ho dle vzorce:

$$\phi_v = [(tg(radians(\phi))) \cdot (z + v_o)] = \underline{\underline{110,76mm}}$$

- **Příklad pro výpočet úhlopříčky:**

Výpočet úhlopříčky je pomocný údaj, který slouží ke kontrole nastavených vzdáleností. Souhlasí-li vypočítaný údaj úhlopříčky s naměřeným údajem již nastavené monitorovací soustavy, proběhlo měření a nastavování aparatury v pořádku. Úhlopříčku odměřujeme od zrcadla po střed objektivu.

Úhlopříčka byla vypočítána dle vzorce:

$$Uhlopříčka = \sqrt{\left(\sqrt{(z^2 + y^2)} + x^2\right)} = \underline{\underline{3646,88mm}}$$

Tabulka 4. Přepočítané vzdálenosti fotoaparátu vůči zrcadlu

Číslo zrcadla	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Úhlopříčka [mm]	Vychýlení θ_v [mm]	Vychýlení φ_v [mm]
1	1283,22	2619,05	2978,00	3646,88	674,11	110,76
2	802,67	2615,89	2946,00	3479,47	665,74	329,95
3	324,61	2609,56	2883,00	3340,38	649,31	542,32
4	-90,25	2601,07	2788,00	3233,17	624,81	742,91
5	-560,26	2588,42	2662,00	3161,15	592,72	926,78
6	-1021,84	2573,62	2505,00	3127,61	553,44	1088,29
7	1523,00	2202,67	3039,00	3597,96	488,06	0,00
8	1041,24	2200,60	3023,00	3410,37	484,88	223,71
9	560,12	2196,36	2975,00	3248,96	475,38	442,82
10	81,36	2188,98	2895,00	3118,04	459,71	652,61
11	-332,34	2177,45	2784,00	3022,43	438,25	848,33
12	-799,36	2163,77	2643,00	2967,27	411,48	1025,09
13	1282,34	1784,52	3235,00	3375,94	295,05	112,67
14	801,06	1781,37	3203,00	3194,08	290,68	335,74
15	321,30	1775,08	3139,00	3040,78	282,02	551,93
16	-95,21	1765,65	3044,00	2922,14	269,37	756,64
17	-564,82	1754,08	2917,00	2842,07	252,89	944,61
18	-1027,93	1738,38	2760,00	2804,94	233,13	1110,88
19	1524,00	1367,46	3247,00	3375,51	100,52	0,00
20	1042,49	1365,39	3232,00	3174,96	99,30	224,09
21	562,64	1361,19	3185,00	3002,32	95,74	443,77
22	87,20	1352,85	3105,00	2860,54	89,90	654,14
23	-324,13	1342,38	2995,00	2757,72	82,10	850,87
24	-787,72	1328,77	2854,00	2696,83	72,62	1028,65
25	1283,96	949,26	3241,00	3204,88	-94,78	111,60
26	808,44	946,63	3240,50	3044,84	-96,19	335,82
27	334,98	940,38	3208,00	2915,20	-98,03	557,64
28	-74,70	931,49	3145,50	2821,68	-100,23	772,90
29	-538,41	919,48	3050,50	2764,43	-102,48	976,37
30	-995,56	904,34	2925,50	2747,35	-104,55	1163,60

9.2 Přesné určování vzdálenosti

Aby bylo měření a následné nastavování co nejpřesnější, bylo zapotřebí vytvořit, nebo vymyslet spolehlivé měřidlo vzdáleností. Byl otestován obyčejný pásový metr, který byl dost nepřesný a těžko se s ním měřily nepřístupné části a větší vzdálenosti. Odměřování lankem bylo také nepřesné, protože už pouhé uchycení lanka (smyčka) vkládala chybu do odměřování. Další jeho nevýhodou bylo, že lanko se na delší vzdálenosti pronášelo a nebylo ho možné řádně napnout. Proto byl zakoupen laserový měřič vzdálenosti Leica Disto A2 viz obr. 53. Tento měřič vzdálenosti se ukázal jako nejlepší možné řešení jak z hlediska přesnosti měření, tak i z hlediska jednoduchosti měření.



Obr.53: Laserový měřič vzdálenosti Leica Disto A2

Technická data Disto A2:

přesnost do 30 m \pm 1.5 mm

dosah 60 m minimální záměra 5 cm

rozlišení na displeji 1 mm

napájení 1 x 9V

životnost baterií až 5 000 měření

rozměry (d x š x v) 124 x 45 x 31 mm

9.3 Příprava reflexní sítě

Nyní bylo třeba vytvořit reflexní síť a konstrukci na reflexní síť tak, aby byla dostatečně stabilní a hlavně, aby umožňovala posun reflexní sítě podle toho, na jakou stranu bude zrcadlo zrovna nakloněné. Zajistit tyto podmínky se nám podařilo namontováním jednoduchých hliníkových profilů na těžký železný podstavec, který zajistil dostatečnou stabilitu. Samotná reflexní síť byla přilepena na rovnou dřevěnou desku, která při osvětlení odráží světlo jen minimálně viz obr. 54.

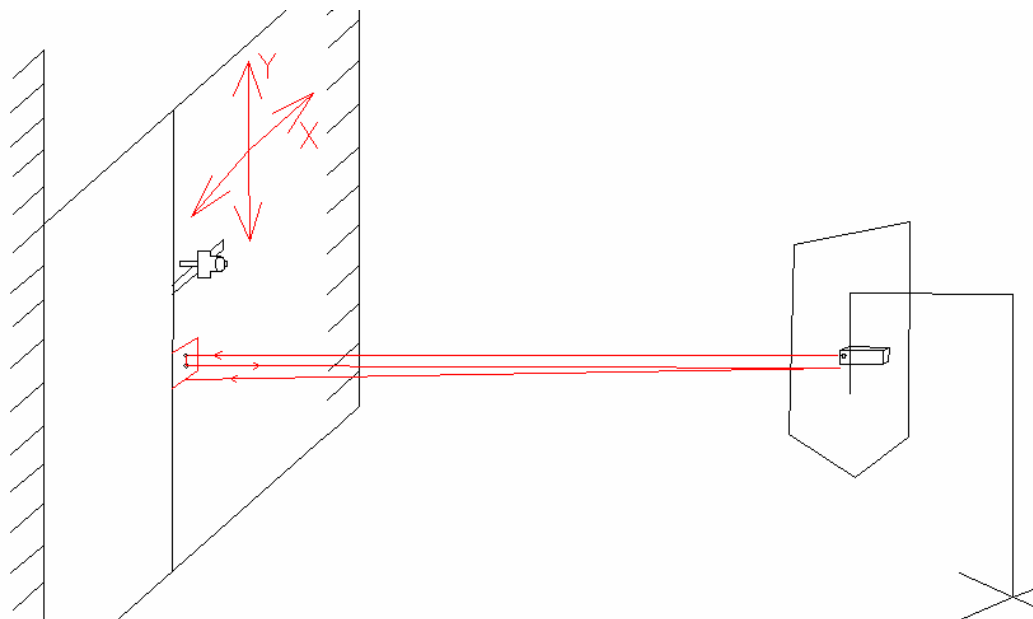


Obr.54: Umístění a upevnění reflexní sítě

9.4 Metodika měření

Při nastavování vzdáleností fotoaparátu vůči zrcadlu je zapotřebí obzvlášť dbát na přesnost odměřování. Důležité bylo uvědomit si a určit od kterého pevného bodu se budou jednotlivé vzdálenosti odměřovat. Níže je uvedená posloupnost měření, jak byla prováděna od samotného nastavování po konečné měření:

- 1) **Nastavení osy X** – Pro nastavování osy X je podstatná výchozí poloha zrcadla, kdy je zrcadlo nastaveno kolmo k podlaze laboratoře. Výchozí polohu zrcadla nastavíme tak, že paprsek pomocného laseru procházející středem zrcadla dopadá na optický odrazný hranol umístěný na posuvné konstrukci pro fotoaparát. Paprsek se v hranolu odrazí, jde zpět do zrcadla a pokud se paprsek odrazí zpátky od zrcadla k hranolu do stejného místa, je zrcadlo nastavené ve výchozí poloze viz obr. 55.



Obr.55: Nastavení výchozí polohy

Na obrázku vidíme jak by mělo vypadat výchozí nastavení zrcadla. Paprsek laseru nedopadá do stejného místa na optickém hranolu, protože je zrcadlo sférické a to nám způsobuje mírnou, ale předpokládanou odchylku.

Nyní už je možné odměřit a nastavit souřadnici X podle tabulky 4. Odměřování je prováděno laserovým měřičem vzdálenosti Disto A2 (dále již jen Disto A2) od bodu kde dopadá paprsek do optického hranolu, po vnější část objektivu fotoaparátu.

- 2) **Nastavení osy Z** – Odměření osy Z podle tabulky je prováděno rovněž pomocí Disto A2. Měřič je přiložen k hornímu okraji zrcadla a vzdálenost je měřena po protilehlou zeď. Pokud tento údaj podle tabulky 2 nesouhlasí, posune se podle potřeb zrcadlo jedním nebo druhým směrem.
- 3) **Nastavení úhlu θ a φ** – Nastavení úhlu θ a φ je provedeno s použitím pomocného laseru. Pomocný laser je pevně připojený ke stojanu. Vychýlí-li se zrcadlo, vychýlí se i laser a vhodnými přepočty (viz. kapitola 9.1.1) získáme hodnoty uvedené v tabulce 2, které jsou následně odměřovány pomocí pásového metru na protější zdi. Počátek odměřování je dán dopadem laseru na zdi ve výchozí poloze.

- 4) **Znovu nastavení osy Z** – Nyní je třeba stejným způsobem jako v bodě 2) nastavit osu Z, protože při vychýlení se rozměr změní. Bod 2) je prováděn před bodem 3) proto, aby byla osa Z přibližně nastavená tak, abychom už poté nemuseli složitě manipulovat se zrcadlem.
- 5) **Nastavení osy Y** – Nyní, když už jsou nastaveny osy X, Z i vychýlení zrcadla, je možné nastavit osu Y. Osa Y je odměřována od podlahy po vnější část objektivu fotoaparátu.
- 6) **Změření úhlopříčky** – Úhlopříčka je měřena proto, aby byla provedena kontrola správnosti všech předešlých nastavení. Pokud naměřená hodnota úhlopříčky souhlasí s hodnotou v tabulce, je předešlé nastavení správné. Odměřování úhlopříčky je provedeno od horního kraje zrcadla po přední část objektivu.
- 7) **Nastavení reflexní sítě** – Při nastavování různých poloh fotoaparátu a zrcadla dochází k tomu, že odraz v zrcadle je vždy na jiném místě. Proto, jak již bylo uvedeno kapitole 9.3, je třeba síť nastavit tak, aby se zobrazovala v zrcadle síť celá při jakémkoliv měření polohy zrcadla. To je zajištěno nastavovacím systémem viz. kapitola 9.3.

Při nastavování zrcadel č 25 – 30 dochází k tomu, že zrcadlo již není možné, z důvodu malých rozměrů laboratoře, nasměrovat na reflexní síť. Obraz v zrcadle odpovídá prostoru těsně před reflexní sítí na podlaze laboratoře. Je třeba nasměrovat zrcadlo na reflexní síť, tak aby se parametry obrazu nezměnili. Proto jsem si pomohl položením rovinného zrcadla na podlahu v místě obrazu. Tím dosáhneme toho, že obraz fotoaparátu se přes rovinné zrcadlo dostane na reflexní síť.
- 8) **Nastavení fotoaparátu** – Nastavování fotoaparátu se ukázalo poněkud složitější, než se zdálo. Nikde nebylo možné zjistit jak je fotoaparát nakloněný, proto bylo třeba přejít k náhradnímu řešení. Díky tomu, že monitorovací systém byl již namontovaný v RICH-1 a byly provedeny první testovací fotografie, bylo možné provést nastavování fotoaparátu porovnávací metodou. Toto nastavování spočívalo v tom, že obraz konkrétního zrcadla vyfocený v laboratoři viz obr.56a byl porovnáván s obrazem konkrétního zrcadla vyfoceném v RICH-1 viz.

obr.56b. Pokud se obrazy shodovali v poloze obrysů i v naklonění reflexních proužků, potom bylo nastavení fotoaparátu v pořádku. Pokud ne, muselo se vždy mírně pozměnit nastavení fotoaparátu a znovu provést porovnávání obrazů v laboratoři s obrázkem z RICH-1. Porovnávání bylo realizováno v programu Power point, kde pro to existuje vhodná funkce, která z průhlední pozadí obrázku tak, že můžu přesně porovnávat reflexní proužky zrcadla v laboratoři a zrcadla v RICH-1 viz obr.57.



Obr.56: Obrázek vlevo zobrazuje nastavení zrcadla č.15 v laboratoři. Obrázek vpravo zobrazuje nastavení zrcadel v RICH-1.



Obr.57: Obrazové porovnávání nastavení zrcadla č.15 v laboratoři se zrcadlem č.15 v RICH-1.

Výraznější reflexní proužky na obr.57 jsou proužky z obrázku pořízeném v laboratoři TUL a méně výrazné o proužky jsou reflexní proužky pořízené v RICH-1. Z obr.57 je vidět, že reflexní proužky a obrysy zrcadla jsou rovnoběžné s minimální odchylkou. Proto je již možné tvrdit, že nastavení fotoaparátu i zrcadla je stejné jako v RICH-1 a mohlo být zahájeno finální měření a focení s interferometrem.

- 9) **Nastavení interferometru** – Interferometr je nastavován vždy před počátkem měření tak, aby se mohlo měřit vychýlení zrcadla v celém potřebném rozsahu $\pm 0'' - 200''$. Pře změně horizontálního měření na vertikální je třeba taktéž znovu změnit nastavení měření interferometru z horizontálního na vertikální. Na obr.41 je zakresleno vertikální měření (ve směru X).
- 10) **Finální focení** – Finální focení znamená, že bylo-li vše nastaveno tak jak v RICH-1 (zrcadlo, fotoaparát, síť), mohlo být foceno 10 obrázků v kladném a přibližně 10 obrázků v záporném horizontálním posouvání v rozmezí $0''$ až $200''$. Stejný postup měření byl opakován při měření vertikálního posouvání zrcadla.

Tento postup deseti bodů úspěšně posloužil ke změření 29 zrcadel. Poslední zrcadlo č.30 nemohlo být změřeno z důvodů toho, že při focení v detektoru RICH-1 ho zakrývalo pomocné odrazné zrcadlo, tudíž ve výsledném porovnávacím obrázku nejde vidět. To ovšem není na závadu, protože toto zrcadlo není takřka využíváno v porovnání s ostatními zrcadly. Velikost naměřených dat bylo přibližně 22 GB. Data byla následně předána ke zpracování ing. Lukáši Šteigerovi.

10 Závěr

V průběhu diplomové práce jsem se seznámil s detaily optických systémů (fotoaparáty, objektivy apod.), které bylo potřeba navrhnout a otestovat. Zařízení bylo vybráno správně a prováděné zkoušky v laboratoři dokázali použitelnost veškerých optických zařízení. Dále byly otestovány možnosti umístění fotoaparátu vůči síti, materiál a osvětlení sítě. Testy a návrhy přesně odpovídali obdobným testům prováděnými v Itálii, tudíž byly jednomyslně přijaty. Problém vznikl pouze s otázkou zda namontovat fotoaparáty do, nebo vně detektoru. V případě montáže do detektoru by mohly vzniknout technické potíže, které by nebyli v průběhu chodu urychlovače opravitelné. Naopak vnější montáž fotoaparátů s vyřezáním otvorů do kovového obalu, problém s technickými parametry vylučoval. Horší byla ovšem technická realizovatelnost tohoto návrhu, protože by otvor musel být dokonale utěsněn. Nakonec se po obšírné odborné debatě rozhodlo pro vnější umístění (příloha 4).

Realizovaný měřicí systém byl i za mé spoluúčasti včas namontován do RICH-1 a ukázalo se, že simulace byly správné a systém funguje podle předpokladů. Systém snímá celou plochu zrcadel aniž, by bylo nutno vstupovat a zasahovat do samotného detektoru.

Závěrečné měření naklonění všech třiceti zrcadel, ve fyzikální laboratoři bylo z celé diplomové práce časově nejnáročnější. Padesát procent času zabrala samotná příprava měření a další čas samotné měření. Provedlo se nastavení zrcadel do 30 poloh a vyfotily se obrázky při různých vertikálních i horizontálních naklonech v rozsahu 0" až 200". Máme tedy laserovým interferometrem zkalibrovanou metodu pro měření vychýlení zrcadel v detektoru RICH-1. Data tohoto měření zaujímají přibližně 22 GB dat, které budou i nadále využívány při vyhodnocování obrazu v detektoru RICH-1, které již realizuje Ing. Lukáš Steiger.

Tato diplomová práce se tedy zabývala konkrétním návrhem, sestavením, otestováním monitorovacího systému a zkalibrováním měřicí metody pro měření vychýlení zrcadel v RICH-1. Další potřebnou částí, která navazuje na tuto diplomovou práci, je snímání obrazu, zpracování obrazu a případné provádění počítačových korekcí vychýlení zrcadel.

Literatura

- [1] D. Kramer, *Optical concentrators for Čerenkov light detector*, (Diplomová práce), Liberec: TUL, 2005, 56 s.
- [2] M. Laub, *Development of opto-mechanical tools and procedures for the new generation of RICH-detectors at CERN*, (Disertační práce), Praha: ČVUT, 2001, 157 s.
- [3] S.Costa, *The Mirror system of Compass RICH-I*, Turín: INFN-Sezione di Torino and Univerzity of Torino, RICH, 2002, 14 s.
- [4] P. Dalloz, R. Valbuena, *The COMPASS RICH-I mirror wall geometry*, Ženeva: CERN, SC/RICH, 2000, 14 s., EST-ESI/99-08.
- [5] P. Fauland, *The COMPASS Experiment and the RICH-I Detector*, (Disertační práce), Mannheim: Universität Bielefeld, 2004, 153 s.
- [6] Bass M., *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Inc., New York: 1995.
- [7] J. Fisher, *Optoelektronické senzory a videometrie*, Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [8] http://www.fotografovani.cz/art/forec_amater/canon-5d-r.html?pos=0,
- [9] http://www.fotografovani.cz/art/tech_vybirame_jak/rom_lenses1.html
- [10] <http://www.zemax.com/>
- [11] <http://pccosrv1.cern.ch/compass/detector/rich/>
- [12] S. D. Torre, *News from the RICH-upgrade project*, Ženeva: CERN, 2005.
- [13] S.Costa, *The COMPASS RICH1 mounting of the mirrors*, (Prezentace) Ženeva: CERN, RICH, 2004.
- [14] P. Abbon et al., *COMPASS Collaboration*, Nucl. Instr. and Meth. A 577, 2007, 455
- [15] E. Albrecht et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 553, 2005, 215.

- [16] P. Abbon et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 567, 2006, 114.
- [17] S. Costa et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* 553, 2005, 135.

Spoluautorství článků

- [18] P. Abbon, M. Finger, M. Finger Jr., D. Kramer, J. Polak, M. Slunecka, L. Steiger, M. Sulc, M. Svec, et al., *Fast photon detection for COMPASS RICH-1*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572, 2007, 419–421.
- [19] Abbon, P., Finger M., Finger M. Jr., Kramer D., Polak J., Slunecka M., Steiger L., Sulc M., Svec M., Fast photon detection for COMPASS RICH-1, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS 56: F307-F314 Suppl. F, 2006
- [20] Abbon, P., Finger M., Finger M. Jr., Kramer D., Polak J., Slunecka M., Steiger L., Sulc M., Svec M., Hartmann test of the COMPASS RICH-1 optical telescopes, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS 56: F323-F328 Suppl. F, 2006

Nove články, zaslané do Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

- [21] hl. autor M.Sulc, *ON-LINE MIRROR ALIGNMENT MONITORING METHOD FOR COMPASS RICH-1* M.Alekseev, R.Birsa, F.Bradamante, A.Bressan, M.Chiosso, P.Ciliberti, M.L.Colantoni, S.Costa, S.Dalla Torre, V.Diaz, V.Duic, A.Ferrero, J-Ch.Gayde, M.Giorgi, B.Gobbo, D.Kramer, S. Levorato, A.Maggiora, A.Martin, G.Menon, D.Panzieri, G.Pesaro, J. Polak, E. Rocco, P.Schiavon, L.Steiger, F.Sozzi, M.Sulc, M.Svec, S. Takekawa, F.Tessarotto, Zasláno do Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007.
- [22] hl. autor A. Teufel, *The characterisation of the multianode photomultiplier tubes for the RICH-1 upgrade project at COMPASS*, P.Abbon, M.Alexeev, H.Angerer, R.Birsa, P.Bordalo, F.Bradamante, A.Bressan, M.Chiosso, P.Ciliberti, M.L.Colantoni, T.Dafni, S.Dalla Torre, E.Delagnes, O.Denisov, H.Deschamps, V.Diaz, N.Dibiase, V.Duic, W.Eyrich, A.Ferrero, M.Finger, M.Finger Jr, H.Fischer, S.Gerassimov, M.Giorgi, B.Gobbo, R.Hagemann, D.von Harrach, F.H.Heinsius, R.Joosten, B.Ketzer, V.N.Kolosov, K.Königsmann, I.Konorov, D.Kramer, F.Kunne, A.Lehmann, S.Levorato, A.Maggiora, A.Magnon, A.Mann, A.Martin, G.Menon, A.Mutter, O.Nähle, F.Nerling, D.Neyret, D.Panzieri, S.Paul, G.Pesaro, C.Pizzolotto,

J.Polak, P.Rebourgeard, F.Robinet, E.Rocco, P.Schiavon, C.Schill, P.Schoenmeier, W.Schroeder, L.Silva, M.Slunecka, F.Sozzi, L.Steiger, M.Sulc, M.Svec, S.Takekawa, F.Tessarotto, A.Teufel, H.Wollny, *Zasláno do Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007.

- [23] hl. autor Stefano Levorato, *Remote Alignment of large mirror array for RICH detectors*, S. Dalla Torre, S. Levorato, G. Menon, J. Polak, L. Steiger, M. Sulc, F. Tessarotto, *Zasláno do Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007.

11 Přílohy

Příloha 1. Program pro testování osvětlení sítě v programu MATLAB

```
function [] = program(img,rect)
clc
i=0;
j=0;
Ia=0;
Ib=0;
a=0;
b=0;
Asigma=0;
Bsigma=0;
J=0;
S=0;
r=0;
g=0;
m=0;
k=0;
l=0;

im=imread(img);
im1=imcrop(im,rect);
im3 = rgb2gray (im1);
im3=double(im3);

prah=255*(graythresh(im3))

for i=1:size(im3,1)
    for j=1:size(im3,2)
        if (im3(i,j))>prah
            %im3(i,j)
            Ia=Ia+im3(i,j);
            a=a+1;
        else Ib=Ib+im3(i,j);
            b=b+1;
        end
    end
end

Ia=Ia/a
Ib=Ib/b

for i=1:size(im3,1)
    for j=1:size(im3,2)
        if (im3(i,j))>prah
            %im3(i,j)
            Asigma=Asigma+(Ia-im3(i,j))*(Ia-im3(i,j));
        else
            Bsigma=Bsigma+(Ib-im3(i,j))*(Ib-im3(i,j));
        end
    end
end

Asigma=sqrt(Asigma/a)
Bsigma=sqrt(Bsigma/b)
```

```

teta=(Ia-Ib)+(10/(Asigma*Bsigma))

J = rgb2gray (im1);

figure
subplot(2,2,[1 3]), imhist(J)
subplot(2,2,2),imshow (J)
subplot(2,2,4),imshow(im1)
pixval

XR=im1;
XG=im1;
XB=im1;

for i=1:size(im3,1)
    for j=1:size(im3,2)
        C(i,j)=im1(i,j,1);
        D(i,j)=im1(i,j,2);
        E(i,j)=im1(i,j,3);

XR(i,j,2)=0;
XR(i,j,3)=0;
XG(i,j,1)=0;
XG(i,j,3)=0;
XB(i,j,1)=0;
XB(i,j,2)=0;
    end
end

figure
subplot(2,3,4),imshow (XR)
subplot(2,2,4),imshow(C)
subplot(2,2,[1 2]),imhist(C)

figure
subplot(2,3,4),imshow (XG)
subplot(2,2,4),imshow (D)
subplot(2,2,[1 2]),imhist(D)

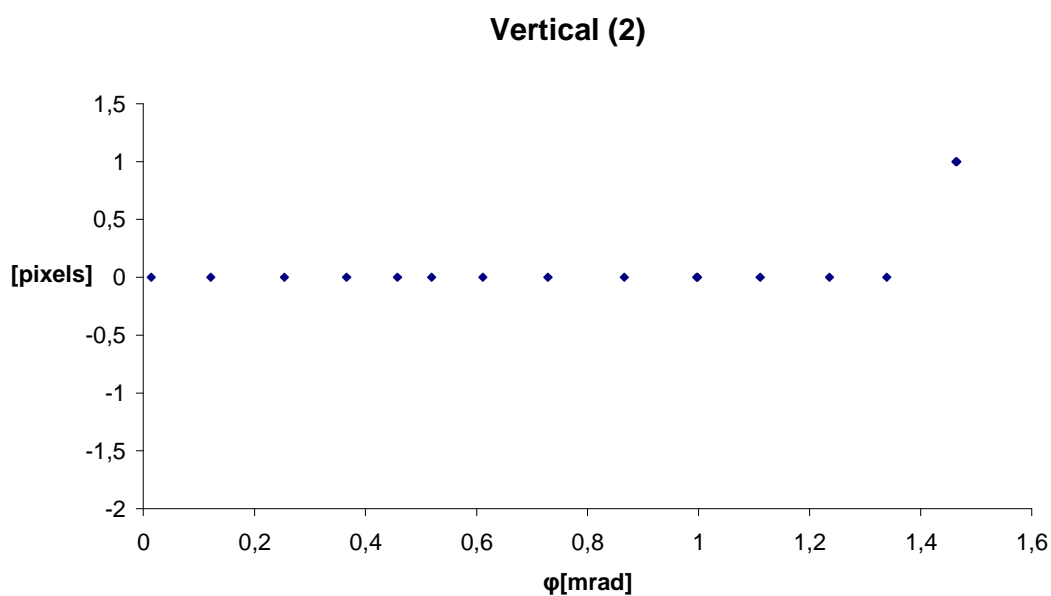
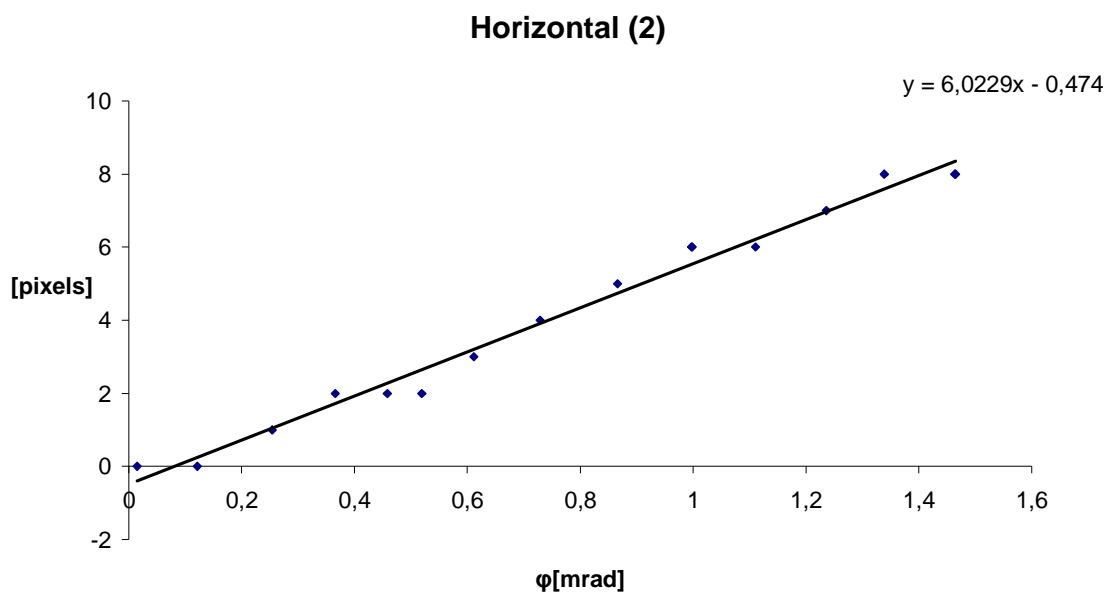
figure
subplot(2,3,4),imshow (XB)
subplot(2,2,4),imshow(E)
subplot(2,2,[1 2]),imhist(E)

figure
imshow(im1);
hold on
plot([0,40],[100,100]);
plot([0,40],[140,140]);
hold off
figure
improfile(im1,[0,40],[100,100]);
figure
improfile(im1,[0,40],[140,140]);

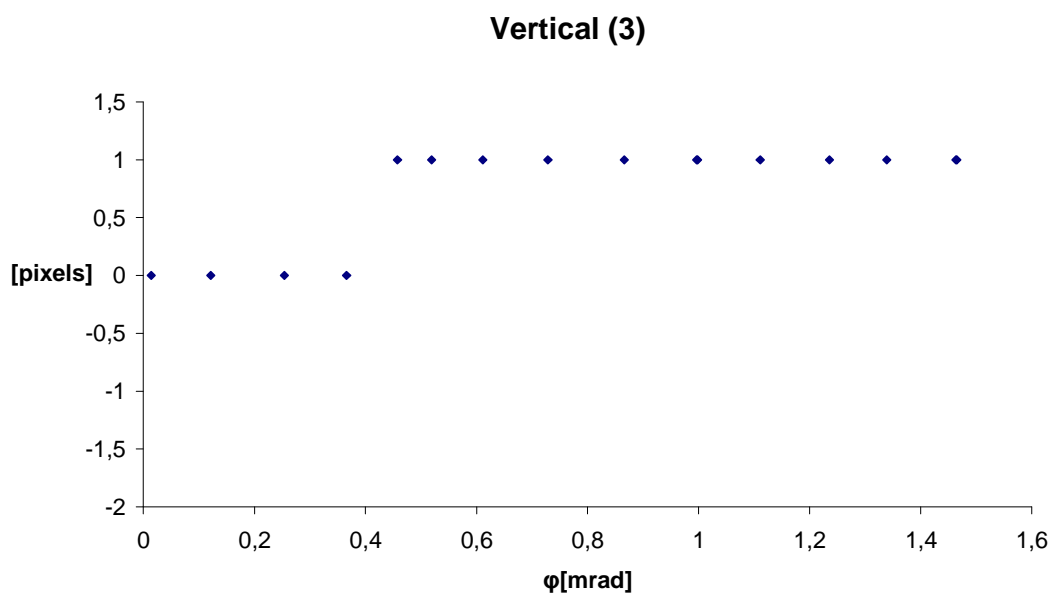
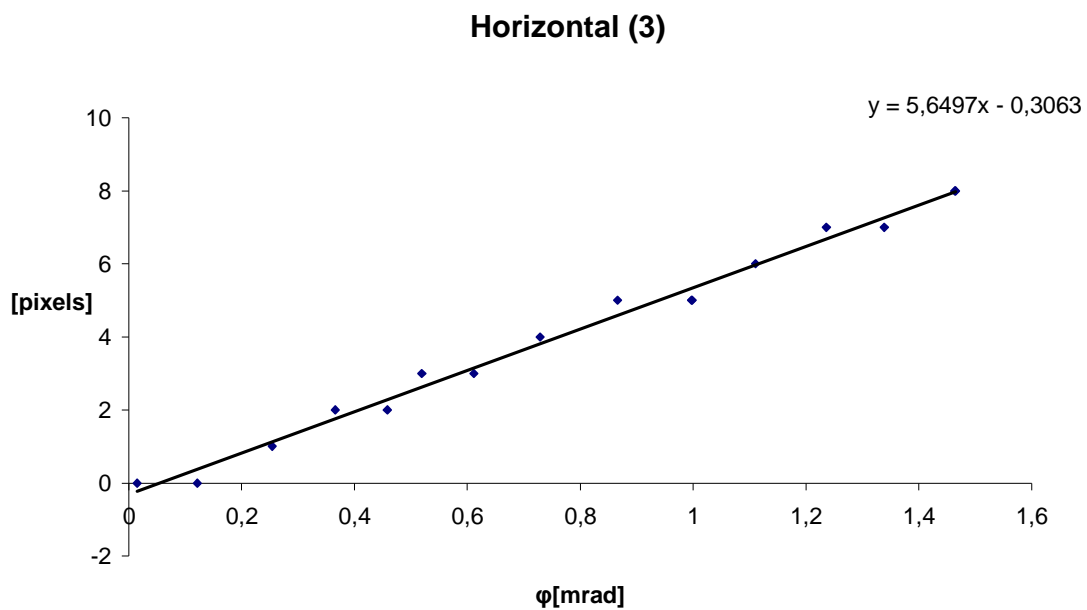
XR1=imcrop(XR,[2150 1289 50 50]);
XG1=imcrop(XG,[2150 1289 50 50]);
XB1=imcrop(XB,[2150 1289 50 50]);

```

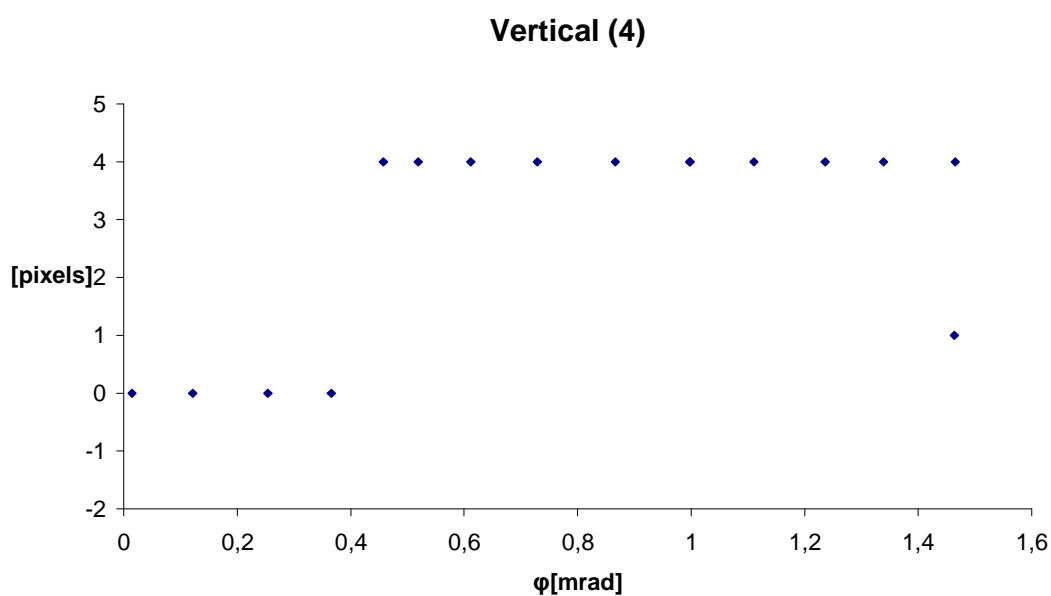
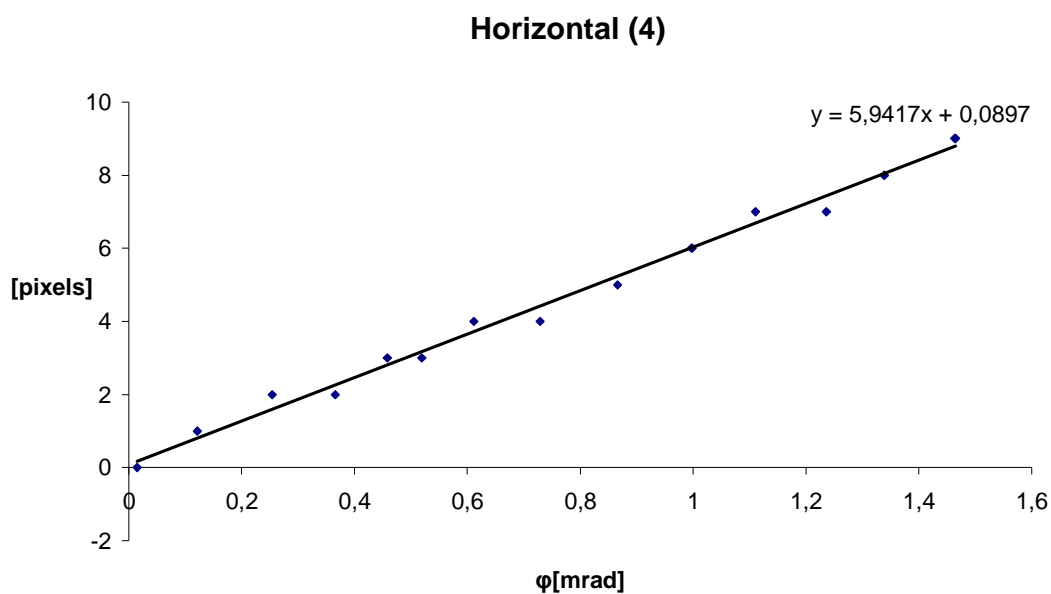
Příloha 2. Závislosti posunů vertikálních a horizontálních čar sítě v obraze při vertikálním a horizontálním vychylování zrcadla



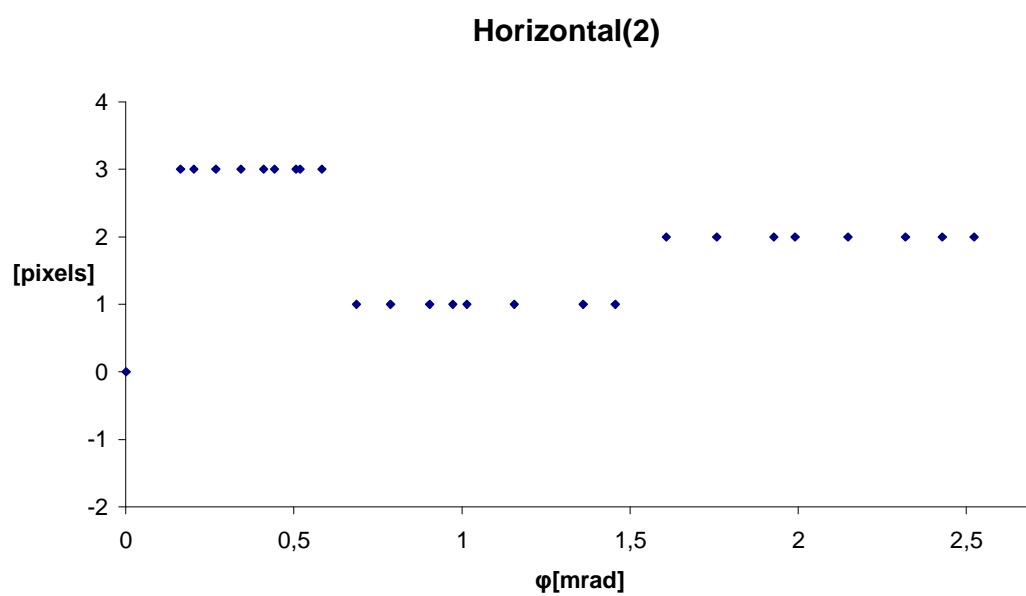
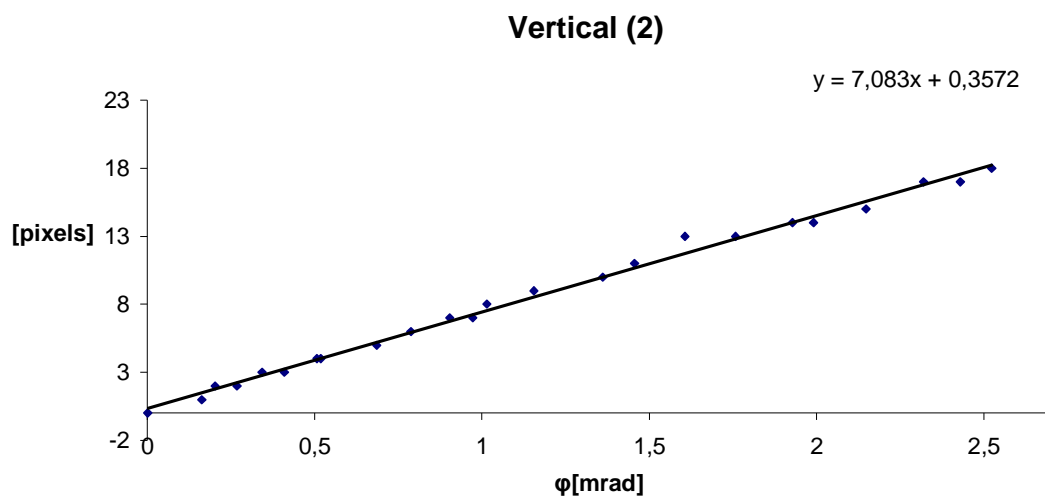
Obr. Vertikální posun a vyhodnocení vychýlení horizontální čáry č.2 a jemu příslušející vychýlení vertikální čáry



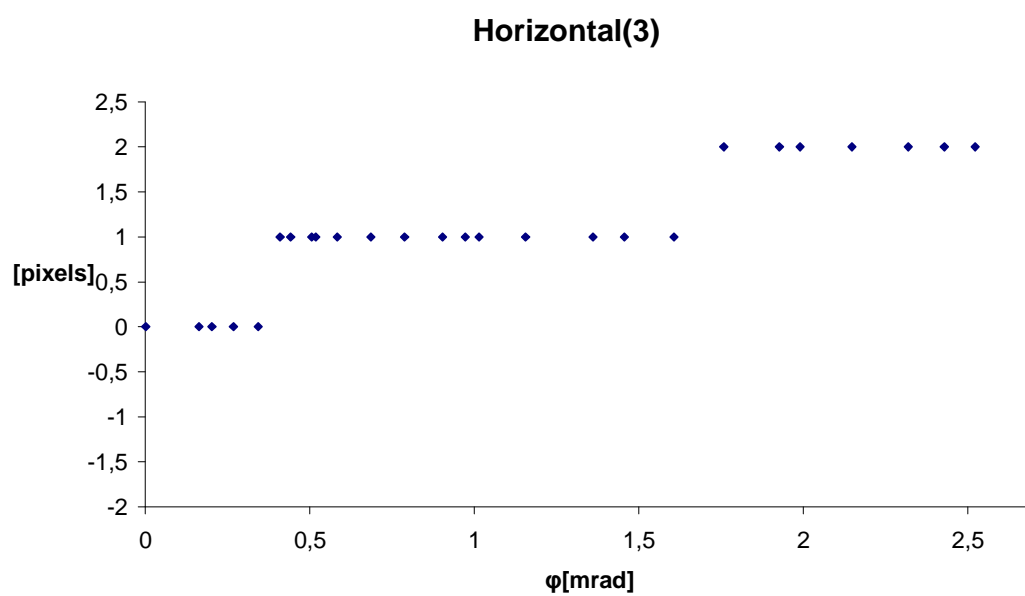
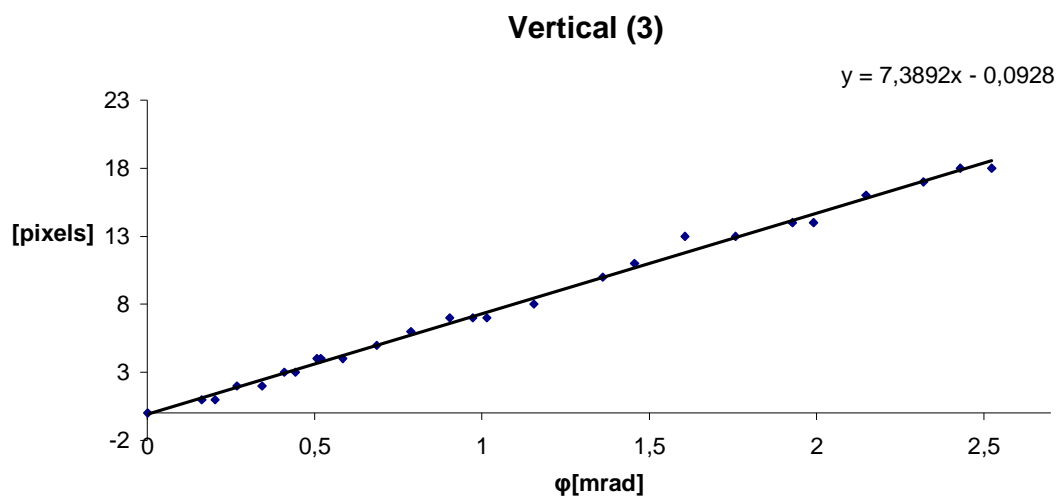
Obr. Vertikální posun a vyhodnocení vychýlení horizontální čáry č.3 a jemu příslušející vychýlení vertikální čáry



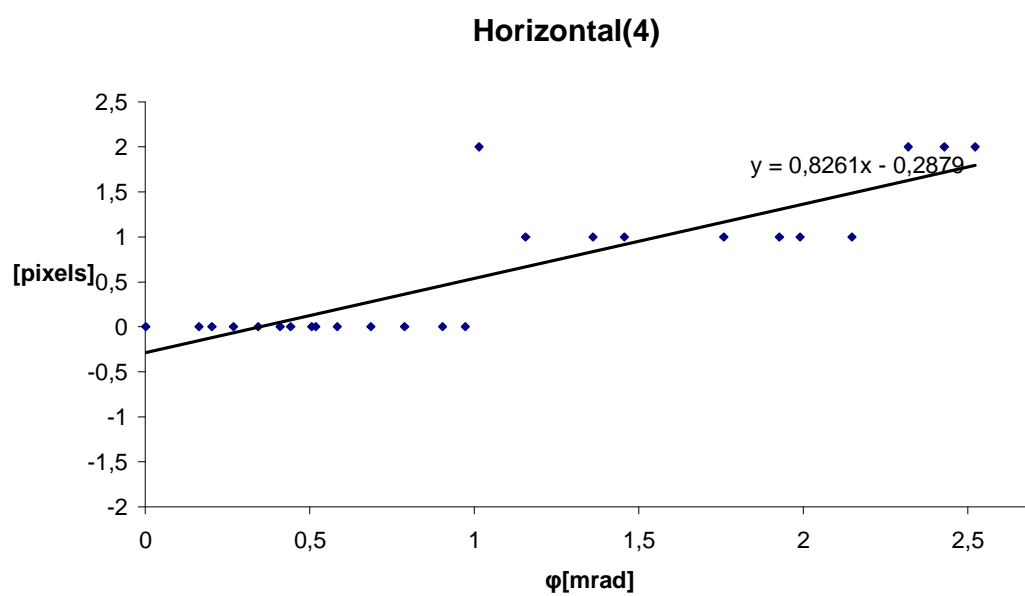
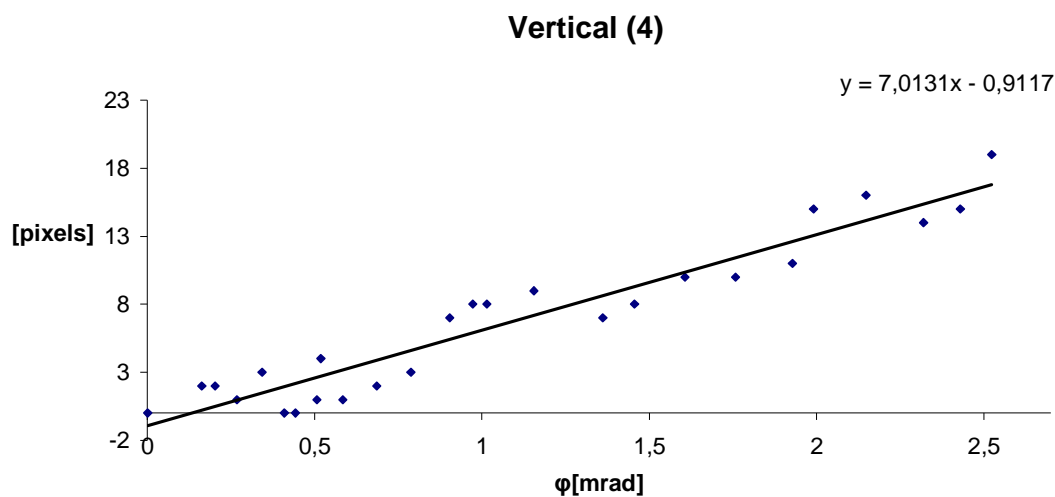
Obr. Vertikální posun a vyhodnocení vychýlení horizontální čáry č.4 a jemu příslušející vychýlení vertikální čáry



Obr. Horizontální posun a vyhodnocení vychýlení vertikální čáry č.2 a jemu příslušející vychýlení horizontální čáry

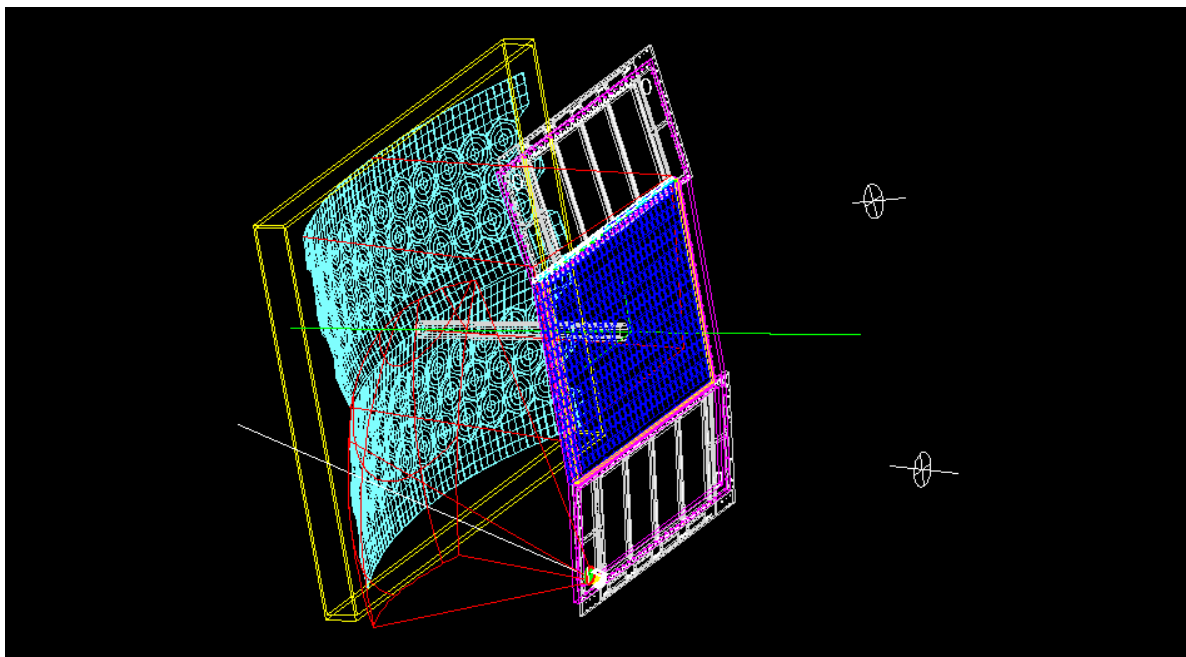


Obr. Horizontální posun a vyhodnocení vychýlení vertikální čáry č.3 a jemu příslušející vychýlení horizontální čáry



Obr. Horizontální posun a vyhodnocení vychýlení vertikální čáry č.4 a jemu příslušející vychýlení horizontální čáry

Příloha 3: Náskres monitorovací soustavy zrcadel RICH
v programu autocad



Příloha 4: Obrázek vnější montáže fotoaparátu do detektoru RICH-1

